

Département de géographie et télédétection  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

Méthode d'inversion de l'épaisseur optique des aérosols, à partir  
d'images satellitaires de télédétection, basée sur un nouveau  
modèle d'indice atmosphérique (ATIM)

Nanouk Paré, 1975-

I-1888

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)  
en géographie physique, cheminement Télédétection

BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Novembre 2001

© Nanouk Paré, 2001

## RÉSUMÉ

La réponse spectrale de la surface, mesurée à partir d'avion ou de satellite, est affectée par la variation spatio-temporelle de l'atmosphère qui se trouve entre le capteur et la surface. L'épaisseur optique des aérosols, une mesure de la profondeur optique des aérosols dans une colonne atmosphérique, est un paramètre qui dépend de la longueur d'onde et qui varie dans le temps et dans l'espace. Généralement, ce paramètre peut être estimé en inversant un modèle de transfert radiatif au-dessus de pixels de végétation dense pris comme référence (*DDV: Dark Dense Vegetation*). Cette caractérisation des pixels de végétation dense se fait par un calcul de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) à partir des données apparentes au capteur. Toutefois, les réflectances apparentes (NDVI apparent) et donc la sélection des pixels de végétation dense sont très sensibles aux variations dans le couvert nuageux, le contenu en vapeur d'eau, l'épaisseur optique des aérosols, la densité et le type de couverture végétale.

L'objectif de cette thèse est de développer une méthode pour extraire l'épaisseur optique des aérosols qui soit moins sensible à la densité de végétation associée à un pixel que le modèle DDV. Le modèle ATIM (*Atmospheric Index Model*) est fondamentalement basé sur le travail de Kaufman et Tanré. Ceux-ci ont démontré que l'estimation de l'indice apparent au capteur, qu'ils ont appelé ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), était aussi sensible que le NDVI au couvert végétal mais significativement moins sensible que le NDVI aux variations atmosphériques sur un large éventail de types de surface.

Le point de départ de notre méthode est de faire l'hypothèse qu'une relation unique doit exister entre l'indice ARVI et l'indice au sol NDVI pour une variété d'atmosphères et de types de surface. Si tel est le cas, l'indice NDVI au sol est extrait des mesures satellitales du ARVI en inversant cette relation (ce qui amène une forme indirecte de correction atmosphérique en terme du NDVI). Le modèle de transfert radiatif pourrait donc être employé pour calculer l'épaisseur optique des aérosols à partir de comparaisons itératives de l'indice apparent et de l'indice NDVI au sol. La méthode ATIM exploite cette idée



fondamentale tout en incorporant des suggestions méthodologiques qui pourraient améliorer le principe comme, l'introduction du concept de la droite des sols nus.

Parce que la relation entre les indices ARVI et NDVI, et les relations dérivées, ont été développées au-dessus d'une variété de types de surface, le modèle ATIM permettra l'estimation de l'épaisseur optique des aérosols pour un plus grand nombre de types de surface que l'approche DDV.

La relation unique entre l'indice ARVI et l'indice au sol NDVI (ou leurs variantes dérivées) a été développée à partir de simulations sur une gamme de types d'atmosphère et de couverture au sol. Une seconde partie des simulations a été effectuée afin de connaître l'influence du type de sol et du type d'atmosphère sur la précision du modèle d'inversion de l'épaisseur optique des aérosols ATIM. Les résultats montrent que le modèle ATIM est plus efficace que la méthode DDV pour retrouver l'épaisseur optique des aérosols.(avec une erreur de 2 à 5% pour le modèle ATIM et de 5 et 8% pour le modèle DDV)

Cette méthodologie a également été validée en utilisant des données satellitaires. Les modèles ATIM et DDV ont été appliqués sur des images SPOT 4 VEGETATION. Les résultats sont comparés avec des mesures, acquises par des photomètres solaires, d'épaisseur optique des aérosols au-dessus de l'Ouest Canadien et de la région du Sahel en Afrique. Les résultats ont démontré que le modèle ATIM est efficace (avec une erreur de 8% ou moins) pour  $NDVI > 2$  alors que le modèle DDV est efficace à partir de  $NDVI > 5$ .

Cette nouvelle approche pour extraire l'épaisseur optique des aérosols, étant applicable sur des surfaces végétales moyennement denses contrairement à la méthode DDV, constitue une amélioration significative aux problèmes de la cartographie des aérosols au-dessus des continents et aux problèmes de la correction atmosphérique des images pour l'observation de la Terre.

## ABSTRACT

The surface spectral response measured from an airborne or satellite sensor is affected by the spatial and temporal variation of the atmosphere between the sensor and the surface. Aerosol optical depth, a measure of the optical thickness of aerosols in an atmospheric column, depends on wavelength and varies in time and space. Traditionally, this parameter has been estimated by inverting a radiative transfer model over dense dark vegetation (DDV) pixels. The selection of DDV pixels is made by employing a satellite level estimated of the NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) as a measure of vegetation darkness. However, this satellite based estimated (apparent NDVI) and thus the selection of DDV pixels is very susceptible to variation in cloud cover, water vapour content, aerosol optical depth and the density and type of vegetation cover.

The research objective of this thesis is to develop a method for the extraction of aerosol optical depth which is less sensitive to the level of darkness which can be ascribed to a given pixel. The ATIM (*Atmospheric Index Model*) is fundamentally based on the work of Kaufman & Tanré. They demonstrated that the satellite level estimation on a vegetation index, which they called the ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), was as sensitive to surface vegetation as the surface NDVI, but significantly less sensitive than the apparent NDVI to atmospheric variations over a large range of surface types.

The starting point of our method was accordingly to hypothesise that a fairly unique relationship must exist between the ARVI and the surface NDVI over a variety of atmosphere and surface types. If this were the case, then the surface NDVI could be extracted from satellite measurements of ARVI by simply inverting this relationship (this effectively amounts to an indirect form of atmospheric correction in terms of the NDVI). A radiative transfer model could then be employed to extract the aerosol optical depth from iterative comparisons of the apparent and surface NDVI. The ATIM method exploits this fundamental idea as well as incorporating methodological refinements which

parallel the historical refinements of the NDVI (such as the concept of a soil adjusted vegetation index).

Because the ARVI / NDVI relation was developed over a variety of surface types, it follows that the ATIM (or related variants) will permit the estimation of aerosol optical depth over a significantly greater range of vegetation based surface types than the DDV approach.

The unique relationship between the ARVI and the surface NDVI (or their derived variants) was first developed using simulations over a range of atmospheric types and surface covers. A second set of validation simulations were then performed in order to investigate the influence of different soil types and atmospheric types on the accuracy of the ATIM aerosol optical depth inversion. The results show that the ATIM is more effective than the DDV based method in retrieving aerosol optical depth (simulated residuals of 2 to 5% versus residuals of 5 to 8% for the DDV based method).

The methodology was also partially validated using real satellite data; the ATIM and the DDV based inversion applied to SPOT 4 VEGETATION data were compared with sunphotometric estimates of aerosol optical depth over Western Canada and African Sahel region. The results show that the ATIM is effective (subjectively defined as retrieval residuals of 8% or less) for  $\text{NDVI} > 2$  while the DDV based method is effective for  $\text{NDVI} > 5$ .

This new aerosol optical depth extraction approach is thus applicable to moderately dense surface vegetation as opposed to the relatively severe density constraint of the DDV method. It should permit a significantly more comprehensive and continuous mapping coverage than the latter technique.



## TABLE DES MATIÈRES

PAGE D'IDENTIFICATION DU JURY

RÉSUMÉ

ABSTRACT

TABLE DES MATIÈRES.....	I
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES ANNEXES.....	IX
REMERCIEMENTS.....	X

1. PROBLÉMATIQUE.....	1
2. OBJECTIFS.....	3
2.1 OBJECTIF PRINCIPAL .....	3
2.2 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES .....	3
3. HYPOTHÈSE.....	4
4. THÉORIE.....	4
4.1 NOTIONS FONDAMENTALES .....	4
4.2 PROPRIÉTÉS SPECTRALES DES SURFACES.....	10
4.2.1 PROPRIÉTÉS SPECTRALES DES FEUILLES .....	10
4.2.2 PROPRIÉTÉS SPECTRALES DU SOL .....	12
4.3 LES INDICES DE VÉGÉTATION .....	14
4.4 L'EFFET DU SOL .....	15
4.5 L'EFFET DE L'ATMOSPHÈRE .....	21
4.6 MASQUE DE NUAGES.....	28
5. MÉTHODOLOGIE.....	29
5.1 SIMULATIONS THÉORIQUES .....	31
5.2 APPLICATIONS AUX IMAGES SATELLITALES .....	35
5.2.1 MÉTHODE DE CALCUL DE LA DROITE DES SOLS NUS .....	39
5.3 MODÈLES D'INVERSION .....	39
5.3.1 MODÈLE D'INVERSION BASÉ SUR LES INDICES DE VÉGÉTATION : ATIM.....	40
5.3.2 MODÈLE D'INVERSION DDV .....	41
6. ANALYSE DES RÉSULTATS.....	43
6.1 RELATION ENTRE LES INDICES APPARENTS ET LES INDICES AU SOL.....	52
6.1.1 RELATION ENTRE LE ARVI APPARENT ET LE NDVI AU SOL .....	52
6.1.2 RELATION ENTRE LE TSARVI APPARENT ET LE NDVI AU SOL .....	54
6.1.3 RELATION ENTRE LE ARVI APPARENT AU CAPTEUR ET LE TSAVI AU SOL .....	57
6.1.4 RELATION ENTRE LE TSARVI APPARENT AU CAPTEUR ET LE TSAVI AU SOL .....	59
6.1.5 RELATION ENTRE LE ATI APPARENT AU CAPTEUR ET LE TSAVI <sub>MOD</sub> AU SOL.....	61



6.2 MODÈLES D'EXTRACTION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS .....	65
6.2.1 MODÈLE D'EXTRACTION DDV ( <i>DARK DENSE VEGETATION</i> ) .....	65
6.2.2 MODÈLE EXTRACTION ARVI/ NDVI.....	68
6.2.3 MODÈLE D'EXTRACTION TSARVI / TSAVI .....	70
6.2.4 MODÈLE D'EXTRACTION ATI / TSAVI <sub>MOD</sub> .....	74
6.3 EFFET DES ANGLES SUR LE MODÈLE D'EXTRACTION ATIM .....	79
6.4 EFFET DU TYPE D'AÉROSOLS SUR LE MODÈLE D'EXTRACTION ATIM.....	86
<b>7. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.....</b>	<b>91</b>
7.1 RELATION ENTRE LES INDICES DE VÉGÉTATION .....	91
7.2 LES MODÈLES D'EXTRACTION .....	92
7.3 EFFETS DES ANGLES ET DU TYPE D'ATMOSPHÈRE .....	94
<b>8. APPLICATIONS AUX IMAGES SATELLITALES.....</b>	<b>95</b>
8.1 COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MODÈLES D'EXTRACTION .....	98
<b>9. VALIDATION DU MODÈLE ATIM.....</b>	<b>113</b>
9.1 COMPARAISON DU MODÈLE ATIM INTERPOLÉ AVEC LES IMAGES AVHRR.....	113
9.2 VALIDATION DU MODÈLE ATIM AVEC LES IMAGES DU SAHEL.....	127
<b>10. CONCLUSION.....</b>	<b>139</b>
<b>11. RÉFÉRENCES.....</b>	<b>143</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>149</b>

## LISTE DES FIGURES

1. REPRÉSENTATION DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE.....	5
2. RÉFLECTANCE SPÉCULAIRE.....	5
3. RÉFLECTANCE DIFFUSE.....	6
4. SIGNATURE SPECTRALE DE LA VÉGÉTATION.....	10
5. SPECTRE DE RÉFLECTANCE, TRANSMITTANCE ET ABSORBANCE D'UNE FEUILLE DE MAÏS VERT.....	11
6. SIGNATURE SPECTRALE DU SOL POUR DIFFÉRENTS NIVEAUX D'HUMIDITÉ.....	13
7. RELATION ENTRE L'INDICE DE VÉGÉTATION NDVI ET L'INDICE FOLIAIRE.....	17
8. REPRÉSENTATION DES PIXELS DANS L'ESPACE PIR / R, SELON LA DENSITÉ DE VÉGÉTATION AU SOL.....	18
9. CONTRIBUTIONS DU SIGNAL AU CAPTEUR.....	22
10. RÉGION D'ÉTUDE, SITES THOMPSON ET WASKESIU	
A) ENCADRÉ DE LA RÉGION D'ÉTUDE, CANADA	
B) SYNTHÈSE TEMPORELLE PAR MAXIMUM DE NDVI DE LA RÉGION D'ÉTUDE.....	36
11. RÉGION D'ÉTUDE, SITE OUAGADOUGOU	
A) ENCADRÉ DE LA RÉGION DU BURKINA FASO, AFRIQUE	
B) SYNTHÈSE TEMPORELLE PAR MAXIMUM DE NDVI DE LA RÉGION D'ÉTUDE.....	37
12. SPECTRES DE RÉFLECTANCE POUR DIFFÉRENTES LONGUEURS D'ONDE ET TYPES DE SOL	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER	
D) TOURBE, SEC, MOYEN .....	44
13. INDICES DE VÉGÉTATION AU SOL EN FONCTION DU TAUX DE COUVERTURE VÉGÉTALE	
A) INDICE TSAVI <sub>MOD</sub> B) INDICE TSAVI C) INDICE NDVI.....	46
14. DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PROCHE INFRAROUGE / HYBRIDE	
A) $\gamma = 1.5$ B) $\gamma = 1.0$ C) $\gamma = 0.75$ D) $\gamma = 0.5$ E) $\gamma = 0.4$ F) $\gamma = 0.3$ .....	48
15. INDICES DE VÉGÉTATION APPARENTS AU CAPTEUR EN FONCTION DU TAUX DE COUVERTURE VÉGÉTALE	
A) INDICE ATI B) INDICE NDWI C) INDICE NDVI D) INDICE ARVI E) INDICE TSARVI.....	51
16. RELATION ENTRE LES INDICES ARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET NDVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$	
A) $\gamma = 1.5$ B) $\gamma = 1.0$ C) $\gamma = 0.75$ D) $\gamma = 0.5$ E) $\gamma = 0.4$ F) $\gamma = 0.3$ .....	53
17. RELATION ENTRE LES INDICES TSARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET NDVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$	
A) $\gamma = 1.5$ B) $\gamma = 1.0$ C) $\gamma = 0.75$ D) $\gamma = 0.5$ E) $\gamma = 0.4$ F) $\gamma = 0.3$ .....	56
18. RELATION ENTRE LES INDICES ARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$	
A) $\gamma = 1.5$ B) $\gamma = 1.0$ C) $\gamma = 0.75$ D) $\gamma = 0.5$ E) $\gamma = 0.4$ F) $\gamma = 0.3$ .....	58
19. RELATION ENTRE LES INDICES TSARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$	
A) $\gamma = 1.5$ B) $\gamma = 1.0$ C) $\gamma = 0.75$ D) $\gamma = 0.5$ E) $\gamma = 0.4$ F) $\gamma = 0.3$ .....	60

<b>20. RELATION ENTRE LES INDICES ATI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI<sub>MOD</sub> SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS <math>\gamma</math></b>	
A) $\gamma = 1.5$ B) $\gamma = 1.0$ C) $\gamma = 0.75$ D) $\gamma = 0.5$ E) $\gamma = 0.4$ F) $\gamma = 0.3$ .....	62
<b>21. GRAPHIQUE DE RÉSIDUS ENTRE LES INDICES DE VÉGÉTATION</b>	
A) ARVI / NDVI B) TSARVI / TSAVI C) ATI / TSAVI <sub>MOD</sub> .....	64
<b>22. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM</b>	
(VALEUR RÉELLE – MODÈLE DDV) POUR DIFFÉRENTES VISIBILITÉS	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER	
D) TOURBE, SEC, MOYEN.....	67
<b>23. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM</b>	
(VALEUR RÉELLE – MODÈLES ARVI / NDVI ET DDV) POUR DIFFÉRENTES VISIBILITÉS	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN	
C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER D) TOURBE, SEC, MOYEN.....	69
<b>24. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM</b>	
(VALEUR RÉELLE – MODÈLES TSARVI / TSAVI ET DDV) POUR DIFFÉRENTES VISIBILITÉS	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN	
C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER D) TOURBE, SEC, MOYEN.....	72
<b>25. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM</b>	
(VALEUR RÉELLE – MODÈLES TSARVI / TSAVI ET ARVI / NDVI) POUR DIFFÉRENTES VISIBILITÉS	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN	
C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER D) TOURBE, SEC, MOYEN.....	73
<b>26. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM</b>	
(VALEUR RÉELLE – MODÈLES ATI / TSAVI <sub>MOD</sub> ET DDV) POUR DIFFÉRENTES VISIBILITÉS	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN	
C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER D) TOURBE, SEC, MOYEN.....	75
<b>27. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM</b>	
(VALEUR RÉELLE – MODÈLES ATI / TSAVI <sub>MOD</sub> ET TSARVI / TSAVI) POUR DIFFÉRENTES VISIBILITÉS	
A) ARGILE, HUMIDE, GROSSIER B) ARGILE, SEC, MOYEN	
C) TOURBE, HUMIDE, GROSSIER D) TOURBE, SEC, MOYEN.....	77
<b>28. A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM SIMULÉE EN FONCTION DE LA VALEUR RÉELLE</b>	
B) DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM EN FONCTION DU NDVI APPARENT.....	79
<b>29. EFFET DES ANGLES DE VISÉE</b>	
A) RÉFLECTANCE APPARENTE DU CANAL PROCHE INFRAROUGE	
B) RÉFLECTANCE APPARENTE DU CANAL HYBRIDE	
C) DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PROCHE INFRAROUGE / HYBRIDE	
D) INDICE ATI APPARENT AU CAPTEUR.....	82



30. A) PENTE DE LA RELATION ENTRE LES INDICES ATI SIMULÉ AU CAPTEUR ET $TS\text{AVI}_{\text{MOD}}$ AU SOL POUR DIFFÉRENTS ANGLES DE VISÉE B) ORDONNÉE À L'ORIGINE DE LA RELATION ENTRE LES INDICES ATI ET $TS\text{AVI}_{\text{MOD}}$ EN FONCTION DE L'ANGLE DE VISÉE.....	84
31. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM POUR DIFFÉRENTS ANGLES DE VISÉE.....	85
32. RELATION ENTRE LES INDICES ATI ET $TS\text{AVI}_{\text{MOD}}$ POUR DIFFÉRENTS TYPES D'AÉROSOLS A) AÉROSOLS DE TYPE CONTINENTAL ET URBAIN AVEC COUVERT DE VÉGÉTATION B) AÉROSOLS DE TYPE DÉSERTIQUE ET SOL DE TYPE SABLONNEUX.....	88
33. DIFFÉRENCE D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (VALEUR RÉELLE – MODÈLE D'EXTRACTION) A) AÉROSOLS DE TYPE CONTINENTAL ET URBAIN B) AÉROSOLS DE TYPE DÉSERTIQUE.....	90
34. EXEMPLE DE LA DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PROCHE INFRAROUGE / HYBRIDE LE 17 AOÛT 1998 SUR LE SITE DE THOMPSON.....	96
35. ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM DES DIVERS MODÈLES EN FONCTION DE L'HEURE D'ACQUISITION, SITE DE WASKESIU A) 26/07/98 B) 16/07/98 C) 23/07/98 D) 24/07/98 E) 03/08/98 F) 04/08/98 G) 05/08/98 H) 17/08/98.....	99
36. ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM DES DIVERS MODÈLES EN FONCTION DE L'HEURE D'ACQUISITION, SITE DE THOMPSON A) 26/07/98 B) 16/07/98 C) 23/07/98 D) 24/07/98 E) 03/08/98 F) 04/08/98 G) 05/08/98 H) 17/08/98.....	102
37. ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM OBTENUE DU MODÈLE D'EXTRACTION EN FONCTION DE LA VALEUR MESURÉE A) MODÈLE ATIM B) MODÈLE DDV.....	104
38. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM AVEC LE MODÈLE $DDV_{\text{NDVI} > 0.3}$ A) THOMPSON 26/07/98 B) WASKESIU 26/07/98 C) THOMPSON 16/07/98 D) WASKESIU 16/07/98 E) THOMPSON 24/07/98 F) WASKESIU 24/07/98 G) THOMPSON 03/08/98 H) WASKESIU 03/08/98 I) THOMPSON 04/08/98 J) WASKESIU 04/08/98 K) THOMPSON 05/08/98 L) WASKESIU 04/08/98 M) THOMPSON 17/08/98 N) WASKESIU 17/08/98 .....	107
39. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM AVEC LE MODÈLE $ATIM_{\text{NDVI} > 0.2}$ A) THOMPSON 26/07/98 B) WASKESIU 26/07/98 C) THOMPSON 16/07/98 D) WASKESIU 16/07/98 E) THOMPSON 24/07/98 F) WASKESIU 24/07/98 G) THOMPSON 03/08/98 H) WASKESIU 03/08/98 I) THOMPSON 04/08/98 J) WASKESIU 04/08/98 K) THOMPSON 05/08/98 L) WASKESIU 04/08/98 M) THOMPSON 17/08/98 N) WASKESIU 17/08/98 .....	110
40. 9 JUILLET 1998 A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM) B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM) C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	114



<b>41. 16 JUILLET 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	116
<b>42. 23 JUILLET 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	117
<b>43. 24 JUILLET 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	119
<b>44. 3 AOÛT 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	120
<b>45. 4 AOÛT 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	122
<b>46. 5 AOÛT 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR .....	123
<b>47. 17 AOÛT 1998</b>	
A) ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
B) INTERPOLATION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM)	
C) FEUX DE FORÊT, IMAGE AVHRR (LE 16 AOÛT 1998).....	125
<b>48. EXEMPLE DE LA DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PROCHE</b>	
INFRAROUGE / HYBRIDE, SITE WASKESIU-THOMPSON (LE 3 AOÛT 1998) ET	
OUAGADOUGOU (LE 7 NOVEMBRE 1999).....	129
<b>49. ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM EN FONCTION DE L'HEURE D'ACQUISITION,</b>	
SITE OUAGADOUGOU A) 30/09/99 B) 01/10/99 C) 01/11/99 D) 02/11/99 E) 07/11/99	
F) 15/11/99 G) 21/11/99 H) 06/12/99 I) 08/12/99 J) 13/12/99.....	130
<b>50. ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM (MODÈLE ATIM) ET NDVI</b>	
APPARENT EN FONCTION DE LA VALEUR MESURÉE .....	133
<b>51. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM SUR LA</b>	
RÉGION DE OUAGADOUGOU	
A)30/09/99 B) 01/10/99 C) 01/11/99 D) 02/11/99 E) 07/11/99 F) 15/11/99	
G) 21/11/99 H) 06/12/99 I) 08/12/99 J) 13/12/99.....	135
<b>52. CARTOGRAPHIE DU NDVI APPARENT AU CAPTEUR AU-DESSUS DE LA RÉGION DE</b>	
OUAGADOUGOU A) 30/09/99 B) 01/10/99 C) 01/11/99 D) 02/11/99 E) 07/11/99	
F) 15/11/99 G) 21/11/99 H) 06/12/99 I) 08/12/99 J) 13/12/99.....	137

## LISTE DES TABLEAUX

1. PARAMÈTRES ET DÉFINITIONS DES ÉQUATIONS DÉCRIVANT LA RÉFLECTANCE APPARENTE AU CAPTEUR.....	8
2. PARAMÈTRES UTILISÉS POUR LA SIMULATION DES RÉFLECTANCES APPARENTES AU SOL.....	33
3. CARACTÉRISTIQUE DU CAPTEUR VEGETATION DE SPOT 4.....	38
4. DROITES DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PIR / RB POUR DIFFÉRENTS $\gamma$ .....	47
5. CONVERSION VISIBILITÉ ET ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM.....	49
6. RELATIONS ENTRE LES INDICES ARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET NDVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$ .....	54
7. RELATIONS ENTRE LES INDICES TSARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET NDVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$ .....	55
8. RELATIONS ENTRE LES INDICES ARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$ .....	57
9. RELATIONS ENTRE LES INDICES TSARVI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$ .....	59
10. RELATIONS ENTRE LES INDICES ATI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI <sub>MOD</sub> SIMULÉ AU SOL POUR DIFFÉRENTS $\gamma$ .....	63
11. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DU MODÈLE D'EXTRACTION DDV .....	66
12. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DU MODÈLE D'EXTRACTION ARVI / NDVI .....	68
13. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DU MODÈLE D'EXTRACTION TSARVI / TSAVI.....	71
14. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DU MODÈLE D'EXTRACTION ATI / TSAVI <sub>MOD</sub> .....	76
15. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DES DIVERS MODÈLES D'EXTRACTION POUR TOUTES LES VISIBILITÉS CONSIDÉRÉES.....	78
16. DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PIR / HYBRIDE POUR DIFFÉRENTS ANGLES DE VISÉE.....	81
17. RELATION ENTRE LES INDICES ATI ET TSAVI <sub>MOD</sub> POUR DIFFÉRENTS ANGLES DE VISÉE.....	83
18. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550 NM POUR DIFFÉRENTS ANGLES DE VISÉE.....	85
19. RELATION ENTRE LES INDICES ATI SIMULÉ AU CAPTEUR ET TSAVI <sub>MOD</sub> SIMULÉ AU SOL POUR DIVERS TYPE D'AÉROSOLS .....	87
20. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DU MODÈLE D'EXTRACTION ATIM (CONSIDÉRANT UN MODÈLE D'AÉROSOLS CONTINENTAL) POUR DIFFÉRENTS TYPES D'AÉROSOLS.....	89
21. PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES SPOT 4 VGT, SITES THOMPSON ET WASKESIU.....	95
22. DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PROCHE INFRAROUGE / HYBRIDE ( $\gamma = 1.0$ ), SITES THOMPSON ET WASKESIU, CANADA.....	97
23. VALEURS RÉELLES D'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM ET DE LA CONCENTRATION EN EAU, SITES WASKESIU ET THOMPSON, CANADA.....	98

<b>24. ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DES MODÈLES D'EXTRACTION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM , SITES THOMPSON ET WASKESIU.....</b>	<b>105</b>
<b>25. PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES SPOT 4 VGT, SITE OUAGADOUGOU, BURKINA FASO, AFRIQUE.....</b>	<b>127</b>
<b>26. DROITE DES SOLS NUS DANS L'ESPACE APPARENT PROCHE INFRAROUGE / HYBRIDE, SITE OUAGADOUGOU, BURKINA FASO, AFRIQUE .....</b>	<b>128</b>
<b>27. ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM ET CONCENTRATION EN EAU, SITE OUAGADOUGOU.....</b>	<b>130</b>



## LISTE DES ANNEXES

1. ORGANIGRAMME MÉTHODOLOGIQUE : SIMULATIONS THÉORIQUES.....	149
2. ORGANIGRAMME MÉTHODOLOGIQUE : ALGORITHME D'INVERSION ATIM.....	150
3. REPRÉSENTATION DES CLASSES.....	151
4. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM AVEC LE MODÈLE D'EXTRACTION DDV ( $NDVI > 0.5$ )	
A) THOMPSON 09/07/98 B) WASKESIU 09/07/98 C) THOMPSON 16/07/98	
D) WASKESIU 16/07/98 E) WASKESIU 23/07/98 F) THOMPSON 24/07/98	
G) WASKESIU 24/07/98 H) THOMPSON 03/08/98 I) WASKESIU 03/08/98	
J) THOMPSON 04/08/98 K) THOMPSON 05/08/98 L) THOMPSON 17/08/98	
M) WASKESIU 17/08/98.....	152
5. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM AVEC LE MODÈLE D'EXTRACTION ATIM ( $NDVI > 0.01$ )	
A) THOMPSON 09/07/98 B) WASKESIU 09/07/98 C) THOMPSON 16/07/98	
D) WASKESIU 16/07/98 E) WASKESIU 23/07/98 F) THOMPSON 24/07/98	
G) WASKESIU 24/07/98 H) THOMPSON 03/08/98 I) WASKESIU 03/08/98	
J) THOMPSON 04/08/98 K) WASKESIU 04/08/98 THOMPSON 05/08/98	
M) WASKESIU 05/08/98 N) THOMPSON 17/08/98 O) WASKESIU 17/08/98.....	155
6. CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE DES AÉROSOLS À 550NM AVEC LE MODÈLE D'EXTRACTION ATIM ( $NDVI > 0.6$ )	
A) THOMPSON 09/07/98 B) WASKESIU 09/07/98 C) THOMPSON 16/07/98	
D) WASKESIU 16/07/98 E) WASKESIU 23/07/98 F) THOMPSON 24/07/98	
G) WASKESIU 24/07/98 H) THOMPSON 03/08/98 I) WASKESIU 03/08/98	
J) THOMPSON 04/08/98 K) WASKESIU 04/08/98 L) THOMPSON 05/08/98	
M) WASKESIU 05/08/98 N) THOMPSON 17/08/98 O) WASKESIU 17/08/98.....	158



## REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier les organismes suivants qui, grâce à leur financement, m'ont permis de faire ce projet de recherche : FCAR, CRSNG, MRI (COLUTEQ) et le Canadian Institute of Climate Studies. Les images ont été fournies par Josef Cilar et Jing Chen du Centre canadien de télédétection dans le cadre du projet VESNA.

Également, mon directeur de recherche monsieur Alain Royer et mon codirecteur monsieur Norman O'Neill qui m'ont supervisé tout au long de ma maîtrise et monsieur Étienne Bartholomé avec qui j'ai fait un stage au Centre Commun de Recherche, Ispra, Italie.

Finalement toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidé et m'ont encouragé à poursuivre : Sébastien, merci pour les programmes informatiques, les précieux conseils et ta patience, Cédric, Chantale, Philippe, Yannick, Yves, Mom and Dad 1<sup>er</sup> du nom!

## 1. Problématique

La réponse spectrale enregistrée par un capteur aéroporté ou satellitaire au-dessus d'une surface végétale représente la contribution de la végétation, de l'ombre, du sol sous-jacent, de l'atmosphère et de l'effet de l'environnement (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman *et al.*, 1997). Pour extraire de cette mesure les paramètres intrinsèques de la surface, il est nécessaire de corriger les données brutes des effets de l'atmosphère (Hu *et al.*, 1998). Le paramètre responsable de la plupart des variations des effets atmosphériques, et donc critique à ce processus d'extraction, est l'épaisseur optique des aérosols (décrite comme étant le logarithme naturel de l'inverse de la transmittance verticale due à l'atténuation des aérosols par l'absorption et la diffusion) (Kaufman et Sendra, 1988, O'Neill *et al.*, 1997). La diffusion résulte en une déviation (ré-émission) du rayonnement par les particules dont les tailles sont du même ordre de grandeur que les aérosols, les grosses molécules et les nuages (Teillet et Fedosejves, 1995; Isakov *et al.*, 1996). La diffusion dépend de ces particules, de leur nature ainsi que de l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement devra traverser. L'absorption résulte en une perte d'énergie, dans la longueur d'onde considérée, dissipée sous forme de chaleur. Ces deux mécanismes sont dépendants de la longueur d'onde et varient dans le temps et dans l'espace, influençant les effets atmosphériques sur les images satellitaires (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman, 1996; Kaufman *et al.*, 1997).

L'une des méthodes de correction des effets des aérosols consiste à sélectionner des pixels de végétation dense (ou d'eau) (DDV : *Dark Dense Vegetation*) (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman, 1988). Cette méthode d'extraction est employée parce que la réflectance au sol dans le canal rouge ne varie presque pas au-dessus de la végétation et que la contribution du rayonnement diffusé par les aérosols est importante au-dessus de la végétation dense, ce qui offre une meilleure inversion de l'épaisseur optique des aérosols (Soufflet, 1997). La sélection des pixels de végétation dense se fait tout d'abord par un calcul de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Rouse *et al.*, 1974) afin de sélectionner les surfaces sombres constituées de végétation pure (Kaufman *et al.*, 1988; Kaufman et Tanré, 1996). Ensuite, il s'agit de faire un balayage de l'image pour trouver les pixels ayant le plus fort NDVI (pour les pixels d'eau : balayage de l'image pour trouver les pixels ayant la plus faible réflectance dans le proche infrarouge est nécessaire). Un algorithme d'inversion, basé sur un modèle de transfert radiatif (Teillet *et al.*, 1995; Olbert, 1998)



(comme 6S de Vermote *et al.*, 1997), est utilisé afin de simuler la réflectance apparente au capteur pour différentes valeurs d'épaisseur optique des aérosols et pour une valeur de réflectance au sol supposée connue et constante. Lorsque la valeur de réflectance mesurée correspond à celle simulée, l'épaisseur optique des aérosols est obtenue (Soufflet, 1992). Dans ce cas-ci, ce sont les réflectances apparentes (simulées et réelles) qui sont comparées puisque l'épaisseur optique des aérosols n'est pas connue. La méthode DDV est acceptée comme étant une méthode robuste de correction des effets des aérosols lorsque le couvert végétal est dense.

Une autre méthode directe pouvant être employée est la méthode des contrastes qui consiste en l'observation des caractéristiques spectrales de deux surfaces possédant un haut contraste (une surface sombre et une surface brillante) entre elles et situées l'une près de l'autre (Tanré *et al.*, 1988). La correction d'une surface foncée dépend principalement de l'estimation de la réflectance atmosphérique. Alors que la correction d'une surface brillante dépend principalement de l'estimation de la transmittance (Vermote *et al.*, 1997), les propriétés optiques, telles que la concentration en eau et en ozone, l'épaisseur optique des aérosols, devraient être invariantes au-dessus de ces deux surfaces rapprochées (Isakov *et al.*, 1996). Par ailleurs, Huete *et al.* (1999) proposent l'indice EVI (*Enhanced Vegetation Index*) comme indice résistant à l'atmosphère. Cet indice introduit une combinaison des canaux bleu, rouge et proche infrarouge de MODIS et améliore la sensibilité à la différence de végétation entre la végétation éparse à la végétation dense. Les indices NDVI et EVI servent à un algorithme de synthèse temporelle qui utilise la fonction de réflectance bidirectionnelle de chaque pixel pour normaliser la réflectance au nadir (Huete *et al.*, 1999).

Cependant, des variations du couvert nuageux, de la vapeur d'eau, de la densité du couvert végétal et la concentration en aérosols apportent des changements dans les valeurs d'indice de végétation NDVI. Ces limitations, dans l'emploi de ces méthodes d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols, rendent leur application restrictive. Une nouvelle méthode d'inversion est proposée afin de réduire la dépendance à certains facteurs tels que la densité du couvert végétal. Cette méthode est basée sur le travail de Kaufman et Tanré. Ils ont démontré que l'estimation de l'indice apparent au capteur ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) était aussi sensible que le NDVI au couvert végétal mais significativement moins sensible que le NDVI aux

variations atmosphériques sur un large éventail de types de surface. Le modèle ATIM (*ATmospheric Index Model*), d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols, s'effectue à partir d'une relation établie entre un indice apparent au capteur et un indice au sol pour différents types d'atmosphère et surfaces de végétation. Cette relation permet i) d'estimer l'indice au sol à partir d'un indice apparent au capteur pour n'importe quel type d'atmosphère et ii) d'estimer l'épaisseur optique des aérosols à partir de calculs itératifs basés sur un modèle de transfert radiatif. Le but est d'arriver à la valeur d'indice apparent au capteur à partir de la valeur d'indice estimé au sol.

Le modèle ATIM s'appuie entre autre sur la combinaison de deux nouveaux indices de végétation : l'indice ATI (*ATmospheric Index*) (Paré, 2000) et l'indice TSAVI<sub>mod</sub> (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index modified*) (Paré, 2000) qui sont reliés selon une relation linéaire. Il est à noter que cette approche nécessite au moins trois bandes (bleu, rouge et proche infrarouge) et n'est donc pas utilisable à partir des données AVHRR. Par contre, le modèle ATIM pourrait être applicable avec les données provenant de MODIS qui possède 18 bandes comprises entre 405nm et 2155nm.

## **2. Objectifs**

### **2.1 Objectif principal**

L'objectif principal de cette recherche est l'étude des variations spatio-temporelles des aérosols par satellite. Cette étude est basée sur une nouvelle méthode nommée ATIM pour extraire l'épaisseur optique des aérosols au-dessus de couverts végétaux moyennement denses et épars. L'objectif de la méthode ATIM est que son application soit moins sensible aux effets du sol que le modèle DDV. L'algorithme d'extraction donnera la possibilité de faire la cartographie des variations spatio-temporelles des aérosols à l'échelle régionale.

### **2.2. Objectifs spécifiques**

Les objectifs spécifiques de cette recherche sont de comparer le modèle ATIM avec la méthode DDV afin de vérifier sa robustesse et de comparer l'efficacité du modèle ATIM à partir de différents indices de végétation (soit les indices ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation*



*Index*), TSARVI (*Transformed Soil Adjusted Resistant Vegetation Index*), ATI, NDVI, TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) et TSAVI<sub>mod</sub> qui seront décrits dans les sections subséquentes). Le modèle DDV est accepté comme étant robuste lorsque le couvert végétal est dense. Les modèles ATIM et DDV seront appliqués aux images satellitaires afin d'établir leur résistance à l'environnement.

### 3. Hypothèse

Les effets atmosphériques et les effets de la densité du couvert végétal sont deux paramètres influençant considérablement les mesures satellitaires. De ce fait, il est possible de retrouver l'épaisseur optique des aérosols en utilisant une relation linéaire entre certains indices directement sur des images satellitaires. On fait l'hypothèse que cette relation reste stable relativement aux conditions atmosphériques (différents types d'aérosols) et aux conditions d'acquisition de données (angles solaires et de visée) de façon à pouvoir contraindre le modèle d'inversion ATIM avec assez de précision ( $< 10\%$ ). Le développement de la relation linéaire ATIM entre les indices apparent et au sol permet de faire l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols au-dessus de diverses surfaces dont le couvert végétal n'est pas connu à priori.

## 4. Théorie

### 4.1. Notions fondamentales

C'est par le rayonnement électromagnétique (composé d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaire) que l'information provenant de la cible est transmise au capteur. La longueur d'onde ( $\lambda$ ) et la fréquence (inversement proportionnelle à la longueur d'onde :  $\lambda^{-1}$ ) sont deux paramètres caractérisant le spectre électromagnétique. D'après la figure 1, le spectre représente le continuum de l'énergie électromagnétique allant des très courtes longueurs d'onde (rayons gamma  $< 0.03\text{nm}$ ) aux très grandes longueurs d'onde (ondes radio  $> 100\text{ m}$ ). Le visible

(0.4  $\mu\text{m}$  à 0.7  $\mu\text{m}$ ), le proche infrarouge (0.7  $\mu\text{m}$  à 1.3  $\mu\text{m}$ ) et l'infrarouge de courtes longueurs d'onde (ce terme fait référence à SWIR : *short wave infrared*) (1.3  $\mu\text{m}$  à 3.0  $\mu\text{m}$ ) sont les parties du spectre électromagnétique qui seront utilisées dans ce projet.

Lorsque le rayonnement électromagnétique atteint une cible, la radiation est soit réfléchiée dans plusieurs directions, soit absorbée ou transmise par la cible. Le rayonnement retourné au capteur subit l'influence de la cible même, de l'environnement entourant la cible et de l'atmosphère.

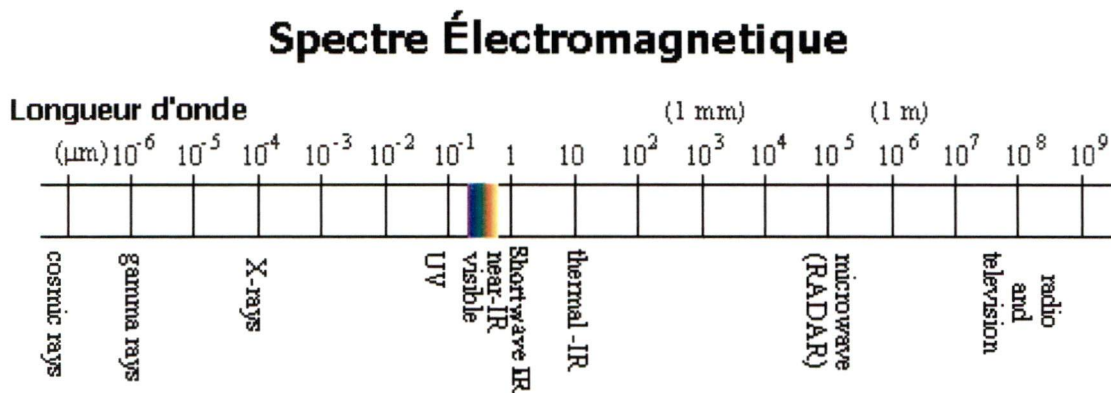


Figure 1 : Représentation du spectre électromagnétique

La réflexion spéculaire est celle qui obéit aux lois optiques établies pour les miroirs, soit la figure 2 où  $\theta_i$  et  $\theta_r$  sont les angles d'incidence et de réflexion par rapport à la normale  $\vec{n}$  d'une surface :

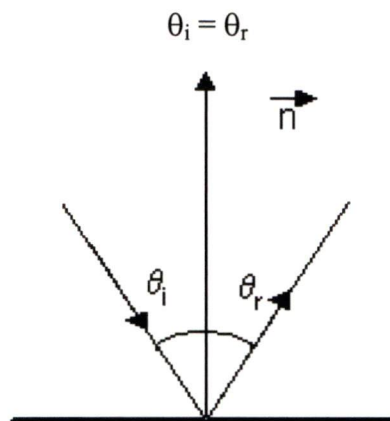
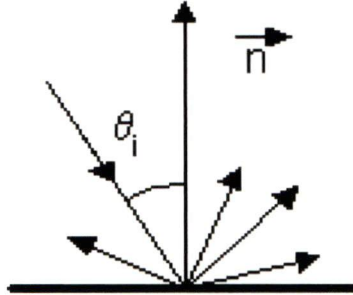


Figure 2 : Réflectance spéculaire

Une réflexion diffuse signifie que le rayonnement réfléchi se fait dans toutes les directions. Un réflecteur diffusant (figure 3) peut être constitué par des réflecteurs spéculaires infiniment petits dont l'orientation et l'inclinaison sont aléatoires, ou encore, par un milieu dans lequel le rayonnement pénètre (feuilles, couvert végétal, nuages,...) et est diffusé par les petites particules ou les éléments qui le compose.



**Figure 3 : Réflectance diffuse**

L'énergie radiative (notée  $Q$  et exprimée en Joules) se définit comme étant la quantité d'énergie associée au rayonnement électromagnétique. Il est possible d'exprimer, à partir du flux énergétique (noté  $\phi$  et exprimé en Watt), l'énergie totale par unité de temps qui est émise par une source, transportée par un faisceau ou reçue au capteur par la relation suivante:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

C'est à partir du flux radiatif absorbé ( $\phi_a$ ), réfléchi ( $\phi_r$ ), transmis ( $\phi_t$ ) et incident ( $\phi_i$ ) que les termes d'absorbance ( $\phi_a / \phi_i$ ), de réflectance et/ou d'albédo ( $\phi_r / \phi_i$ ) et de transmittance ( $\phi_t / \phi_i$ ) peuvent être extraits.

La densité de flux radiatif  $d\phi$  transportée par le rayonnement par élément de surface  $dS$ , est l'éclairement (noté  $E$  et exprimé en  $W m^{-2}$ ):

$$E = \frac{d\phi}{dS} = \frac{d^2Q}{dSdt} \quad (2)$$



La luminance (notée  $L$  et exprimée en  $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ) représente le rapport de l'éclairement  $dE$  provenant de l'illumination d'un élément de surface dans un angle solide  $d\Omega$  autour d'une direction d'incidence  $\theta$  :

$$L(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{dE}{d\Omega \cos \theta} = \frac{d^2 \phi}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (3)$$

La réflectance bidirectionnelle (notée  $\rho$  et sans unité) se définit comme étant le rapport entre le flux radiatif réfléchi par une surface qui serait parfaitement diffuse (surface Lambertienne) et le flux radiatif incident :

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{\pi L(\theta_s, \theta_v, \phi) d^2}{E \cos \theta_s} \quad (4)$$

La réflectance apparente (notée  $\rho^*$  et sans unité), c'est à dire celle acquise par le capteur, peut être décrite par les trois termes suivants, dont les paramètres sont détaillés dans le tableau 1 (Teillet *et al.*, 1995). Il est à noter que le terme «  $*$  » signifie : apparent au capteur et allège le texte. Ces termes sont applicables dans le cas d'une atmosphère non nuageuse et d'une petite cible entourée d'une réflectance environnante homogène et Lambertienne.

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_v) = A\rho + B + C \quad (5)$$

où

$$A = \frac{\tau_g \tau_s \exp(-\delta / \mu_v)}{1 - \overline{\rho S}} \quad (6)$$

$$B = \tau_g \rho_a^*(\theta_s, \theta_v, \phi_v) \quad (7)$$

$$C = \frac{\tau_g \tau_s t_d(\theta_v) \overline{\rho}}{1 - \overline{\rho S}} \quad (8)$$

$$\tau_s = \exp(-\delta / \mu_s) + t_d(\theta_s) \quad (9)$$

**Tableau 1 :** Paramètres et définitions des équations décrivant la réflectance apparente au capteur  
D'après Teillet *et al.*, 1995

Paramètres	Unités	Définition
$\theta_s$	Degrés	Angle zénithal solaire
$\theta_v$	Degrés	Angle zénithal de visée
$\phi_v$	Degrés	Angle azimutal de visée
$\mu_s$	Sans unité	Cosinus de $\theta_s$
$\mu_v$	Sans unité	Cosinus de $\theta_v$
$\delta$	Sans unité	Épaisseur optique des aérosols
$\rho$	Sans unité	Réflectance au sol de la cible
$\bar{\rho}$	Sans unité	Réflectance environnante
$\rho_a^*$	Sans unité	Réflectance intrinsèque de l'atmosphère
$\tau_s$	Sans unité	Transmittance atmosphérique (dans la direction du soleil)
$\tau_g$	Sans unité	Absorption des gaz (dans les deux directions)
$t_d$	Sans unité	Diffusion atmosphérique
S	Sans unité	Albédo sphérique de l'atmosphère

Selon Teillet *et al.* (1995), le premier terme de l'équation indique que les radiations directe et indirecte qui atteignent la cible à la surface de la terre sont atténuées par la transmittance de l'atmosphère ( $\tau_s$ ). Ce terme est relié à une composante directe ( $\exp(-\delta/\mu_s)$ ) et à une composante diffuse ( $t_d(\theta_s)$ ). Le signal qui est renvoyé vers le capteur est également atténué par la transmittance directe ( $\exp(-\delta/\mu_v)$ ). Le dénominateur tient compte de l'albédo sphérique de l'atmosphère ainsi que des réflexions multiples entre l'atmosphère et l'environnement.

Le deuxième terme correspond à la réflectance intrinsèque de l'atmosphère. Il n'y a donc pas d'interaction avec la surface. Ce terme est atténué par la transmittance ascendante et descendante des gaz ( $\tau_g$ ). Le troisième terme représente la contribution de l'environnement. Ici, la transmittance ascendante au capteur est diffusée ( $t_d(\theta_v)$ ) (Teillet *et al.*, 1995). La plus grande partie du signal acquis au capteur, pour une surface foncée ayant une très faible réflectance, provient de la somme de la composante intrinsèque et de la contribution de l'environnement (Soufflet, 1997).

En considérant une partie du flux énergétique monochromatique  $d\phi_\lambda$  qui peut être diffusée ou absorbée par les molécules et les particules constituant un milieu d'épaisseur  $dx$ , on aura :

$$d\phi_\lambda = -\sigma_{e\lambda}\phi_\lambda dx \quad (10)$$

où  $\sigma_{e\lambda}$  (en  $m^{-1}$ ) est le coefficient d'extinction total qui caractérise l'atténuation du faisceau direct et qui s'exprime en fonction du coefficient d'absorption ( $\sigma_{a\lambda}$ ) et de diffusion ( $\sigma_{d\lambda}$ )

$$\sigma_{e\lambda} = \sigma_{a\lambda} + \sigma_{d\lambda} \quad (11)$$

L'épaisseur optique totale (notée  $\delta$  et sans unité) se définit comme étant le logarithme naturel de l'inverse de la transmittance verticale due à l'atténuation des aérosols par absorption et diffusion :

$$\delta(\lambda) = \int_0^\infty \sigma_{e\lambda}(z) dz \quad (12)$$

Son calcul nécessite la connaissance de l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère et de la masse d'air (représentée par  $\mu_s = 1 / \cos\theta_s$ ). Cette épaisseur optique totale résulte de trois phénomènes distincts: la diffusion Rayleigh ( $\delta_{rayleigh}$ ) par les molécules d'air, l'absorption par les composés atmosphériques gazeux ( $\delta_{gaz}$ ) ( $O_3$ ,  $H_2O$ , ...) et la diffusion par les aérosols ( $\delta_{aérosols}$ ).

$$\delta_{totale}(\lambda) = \delta_{rayleigh}(\lambda) + \delta_{gaz}(\lambda) + \delta_{aérosols}(\lambda) \quad (13)$$

L'indice foliaire ou LAI (*Leaf Area Index*) est un paramètre qui caractérise la quantité de matière d'un couvert végétal. Il est défini comme l'aire totale des faces supérieures des feuilles par unité de surface du sol. Le LAI varie typiquement de 0 pour un sol nu à une valeur de 8 à 10 pour un couvert dense et peut dépasser 15 pour une forêt tropicale. L'indice foliaire est un indicateur du taux de couverture végétale. Le taux de couverture du sol désigne plutôt le rapport entre la superficie du sol et la superficie couverte par la végétation.

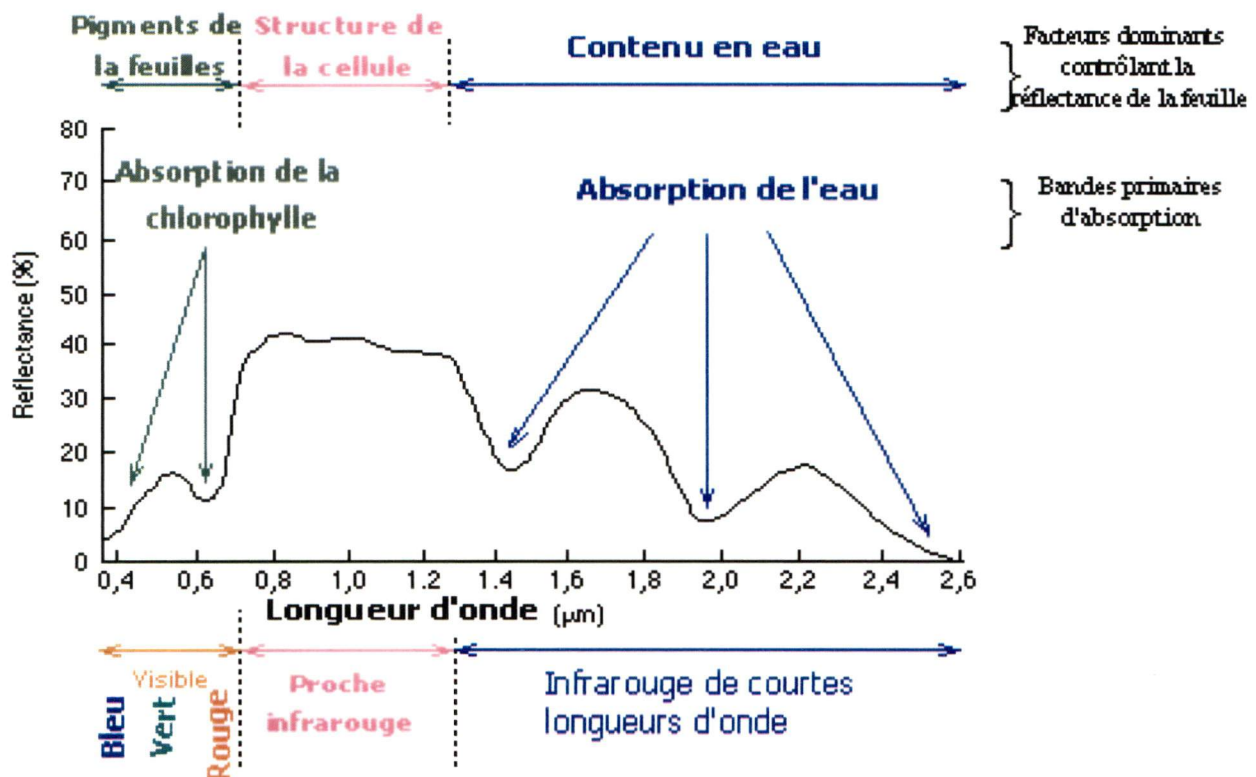


## 4.2 Propriétés spectrales des surfaces

### 4.2.1 Propriétés spectrales des feuilles

Le spectre des feuilles dans les parties visible et infrarouge se caractérise par un signal tel qu'illustré à la figure 4.

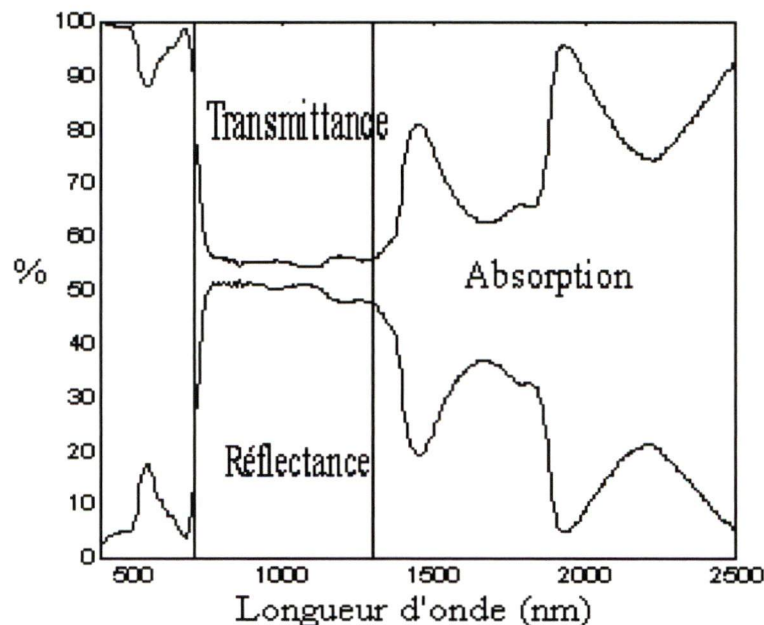
Dans la partie visible du spectre (entre  $0.4 \mu\text{m}$  et  $0.7 \mu\text{m}$ ), l'absorption de la lumière par les pigments de la feuille est dominante dans la signature spectrale et donne une réflectance minimale. Typiquement, cette partie du spectre de réflectance de la végétation comporte des pics d'absorption à  $0.45 \mu\text{m}$  et  $0.67 \mu\text{m}$  correspondant au bleu et au rouge. Dans cette partie, l'absorption de la chlorophylle est prédominante laissant un pic de réflectance vers  $0.55 \mu\text{m}$ .



**Figure 4 :** Signature spectrale de la végétation.  
Adaptée à partir de Leblon, Foresman et Serpi (1999)

Généralement, dans la partie proche infrarouge du spectre (entre  $0.7\ \mu\text{m}$  et  $1.3\ \mu\text{m}$ ), la réflectance de la végétation augmente considérablement au fur et à mesure que le couvert végétal devient plus dense. C'est la structure de la feuille qui explique ces propriétés optiques dans cette partie du spectre et qui réfléchira 40 à 50 % de l'énergie incidente. La plus grande partie de l'énergie restante est transmise, puisque l'absorption dans cette région du spectre est minimale (moins de 5 %). Entre  $0.8\ \mu\text{m}$  et  $1.1\ \mu\text{m}$  la réflectance est maximale et comporte deux bandes d'absorption dues à l'eau, soit vers  $0.96\ \mu\text{m}$  et  $1.1\ \mu\text{m}$ .

Après  $1.3\ \mu\text{m}$ , l'énergie incidente sur la végétation est essentiellement absorbée ou réfléchi, avec peu ou pas d'énergie transmise en surface. Une baisse de réflectance apparaît à  $1.4\ \mu\text{m}$ ,  $1.9\ \mu\text{m}$  et  $2.7\ \mu\text{m}$  due à l'eau contenue dans la feuille qui absorbe fortement à ces longueurs d'onde. Dans l'infrarouge de courtes longueurs d'onde ( $1.58\ \mu\text{m}$  à  $1.75\ \mu\text{m}$ ), la réflectance de la feuille est plus faible que dans la partie du proche infrarouge mais est légèrement plus élevée que dans la partie visible du spectre. La figure 5 (adaptée par Bacour, 1999) permet de voir le spectre de réflectance et de transmittance d'une feuille de maïs verte. La partie centrale de la figure représente l'absorbance foliaire.



**Figure 5 :** Spectre de réflectance, transmittance et absorption d'une feuille de maïs vert.  
Adaptée à partir de Bacour, 1999

#### 4.2.2 Propriétés spectrales du sol

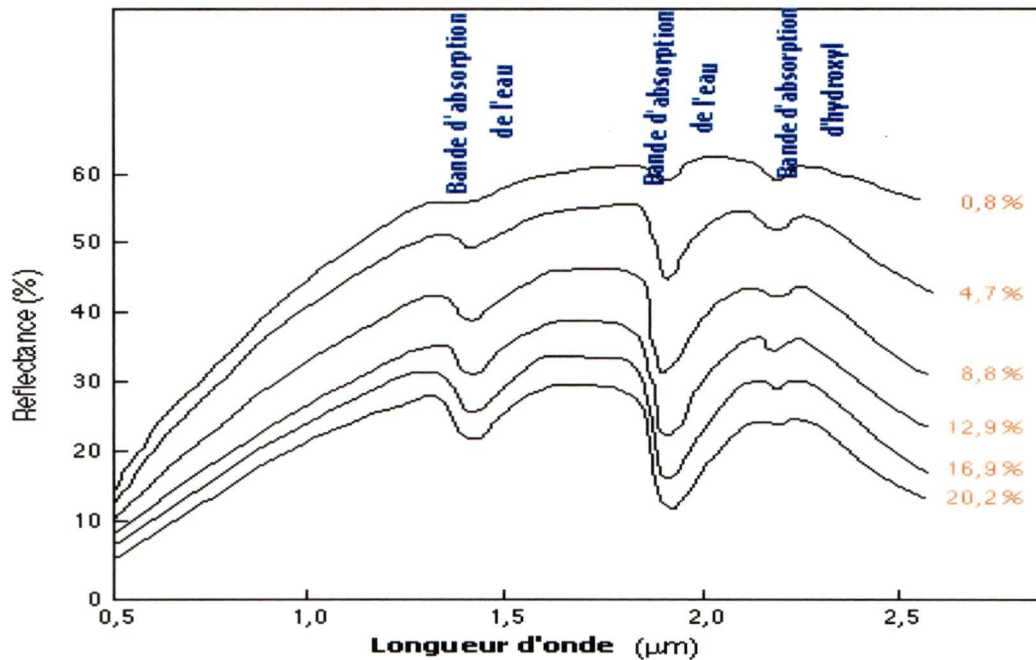
Le spectre de réflectance du sol se caractérise par une réflectance augmentant du bleu au moyen infrarouge. La signature spectrale du sol présente des bandes d'absorption dues à l'eau, vers 1.45  $\mu\text{m}$ , 1.88  $\mu\text{m}$  et 2.66  $\mu\text{m}$  (Baret *et al.*, 1993). Ces bandes d'absorption sont dues au fait que les facteurs qui influencent la réflectance du sol agissent sur moins de bandes spectrales spécifiques.

Les principaux facteurs influençant la réflectance du sol sont l'humidité, la granulométrie, la rugosité, la présence d'oxyde de fer et de composés organiques. La connaissance de ces paramètres est indispensable à une bonne identification du sol et des roches (Baret *et al.*, 1993).

D'après la figure 6 (adaptée par Leblon *et al.*, 1999), plus l'humidité du sol est importante (indiquée en rouge à la droite des courbes), plus la réflectance du sol sera faible. Dans les domaines de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et du moyen infrarouge, les sols ayant des surfaces très sèches auront généralement un niveau de réflectance très élevé, dont l'amplitude dépasse même la réflectance dans les parties visible et proche infrarouge du spectre (Baret et Andrieu, 1999).

Les sols humides apparaissent plus foncés dans l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et le moyen infrarouge due à l'absorption de l'eau. Dans la partie visible du spectre, les sols sont également foncés dus à la différence entre l'indice de réfraction des grains de sol et de l'espace entre les grains qui est réduite lorsqu'ils sont remplis d'eau. Ceci entraîne une augmentation de la dispersion et rend la surface au sol foncée (Kaufman *et al.*, 1997).





**Figure 6 :** Signatures spectrales du sol pour différents niveaux d'humidité.  
D'après Bowers et Hanks (1965) et adaptée à partir de Leblon, Foresman et Serpi (1999).

Pour ce qui est du spectre de réflectance de l'eau, la caractéristique la plus importante est l'énergie absorbée dans le proche infrarouge. L'eau pure a un spectre de réflectance caractéristique qui est élevé dans le bleu, décroît dans le vert, devient très faible dans le rouge et pratiquement nul dans le proche infrarouge. Cependant, l'eau n'est jamais pure, elle contient toujours de la matière en suspension dont la concentration modifie la réflectance. Les surfaces d'eau peuvent être prises comme cibles foncées tant que la réflectance apparente de l'eau est approximativement égale à la réflectance intrinsèque de l'atmosphère (Olbert, 1998).

La modification du signal en fonction de la nature de l'objet permet potentiellement son identification à distance. Ainsi, ces signatures peuvent être influencées par les effets temporels, spatiaux et atmosphériques. L'atmosphère restreint spectralement la surface que l'on peut observer et son effet change avec la longueur d'onde, le temps et l'endroit.

### 4.3 Les indices de végétation

Les indices de végétation sont des combinaisons linéaires ou des rapports de bandes spectrales composés de façon à faire ressortir le signal provenant des pixels de végétation. Ils évaluent la densité du couvert végétal et ses caractéristiques telles que les paramètres de structure de la canopée, les paramètres foliaires et détectent des changements dans l'utilisation du sol survenus dans le temps et dans l'espace (Bannari *et al.*, 1998).

Les premiers indices de végétation, développés en 1972 par Pearson et Miller, font une estimation et un suivi du couvert végétal. Ainsi, le *Ratio Vegetation Index* (RVI) et le *Vegetation Index Number* (VIN) utilisent les réflectances provenant des canaux rouge et proche infrarouge. Cependant, bien que ces indices accentuent le contraste entre le sol et la végétation, ils restent sensibles aux propriétés optiques du sol et aux effets atmosphériques (Baret et Guyot, 1991; Bannari *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 1983)

$$RVI = \rho_R / \rho_{PIR} \quad (14)$$

$$VIN = \rho_{PIR} / \rho_R \quad (15)$$

Où  $\rho_R$  et  $\rho_{PIR}$  sont les réflectances dans les canaux rouge et proche infrarouge respectivement.

Bien qu'environ une quarantaine d'indices de végétation existe (Bannari *et al.*, 1995), celui le plus couramment utilisé, pour le suivi de la végétation sur de grandes échelles spatiales (Myneni et Asrar, 1994; Martin et Viau, 2000), est l'indice développé par Rouse *et al.* (1974), le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Il utilise les contrastes spectraux de la végétation réfléchi dans le canal rouge et proche infrarouge.

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R} \quad (16)$$

Où  $\rho_{PIR}$  et  $\rho_R$  sont les réflectances dans les canaux proche infrarouge et rouge respectivement.

Cet indice intensifie le contraste entre le sol et la végétation et minimise les effets de conditions d'illumination (Bannari *et al.*, 1995). Il est sensible à la présence de végétation verte (Sellers, 1985) mais aussi aux conditions de visée et d'illumination pour des couverts de plus faibles densités (Baret *et al.*, 1991). L'utilisation d'indices de végétation requière non seulement une manière uniforme de calcul de l'indice mais également que ceux-ci puissent être comparables dans le temps et dans l'espace. Cependant, plusieurs facteurs tels que le sol sous-jacent la végétation, l'atmosphère, les nuages et les angles d'acquisition peuvent restreindre l'interprétation des indices de végétation (Huete *et al.*, 1999).

#### 4.4 L'effet du sol

Le sol exerce une certaine influence sur le spectre d'une canopée et donc sur les indices de végétation (Huete, 1988). Dans les régions où il y a des différences de la brillance du sol considérables dues aux types de sol, aux variations de rugosité ou des matériaux organiques, le sol peut induire de fortes variations sur les valeurs d'indices de végétation (Huete, 1988; Bannari *et al.*, 1995; Bannari *et al.*, 1996). La brillance du sol sous-jacent, ainsi que les effets spectraux produits par les sols, influencent la mesure de la réflectance d'un couvert végétal et ce, non seulement avec des couverts végétaux de faibles densités mais également avec des couvertures végétales de près de 75% (Huete *et al.*, 1985). L'influence du sol sous-jacent sur le spectre de réflectance apparente diminue à partir d'un LAI > 2. À cet indice foliaire, la saturation de l'indice commence (Huete *et al.*, 1999).

Selon Huete *et al.* (1985), l'influence du sol sous-jacent est plus importante lorsque le couvert végétal est à un niveau intermédiaire (50 % de végétation verte), car il y a une transmission significative dans le proche infrarouge de l'éclairement incident au sol à travers la canopée. Ceci produit un signal qui est réfléchi par le sol et qui ressemble au spectre de la végétation. De plus, lorsque le couvert végétal est épars, les indices de végétation sont plus influencés par les changements survenant dans la fraction du couvert végétal que par des changements dans l'épaisseur optique des aérosols (Kaufman et Sendra, 1988; Leprieur *et al.*, 2000).



Dans le cas d'un couvert de végétation très dense, il n'y a pas assez de signal traversant la canopée pour se rendre au sol afin de représenter une partie significative du signal mesuré par le capteur. Par contre, lorsque le couvert est faible ou incomplet, une certaine partie du signal interagit avec la végétation et le sol. La présence de sol intensifie le signal dans la partie rouge du spectre et réduit le signal dans la partie infrarouge (Bannari *et al.*, 1995). Par ailleurs, la réflectance du sol contribue à des variations importantes dans le domaine de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et du moyen infrarouge, particulièrement lorsque le sol est très sec (Baret et Andrieu, 1999). Toutefois, plus l'humidité du sol est grande, moins la réflectance dans l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et le moyen infrarouge sera importante.

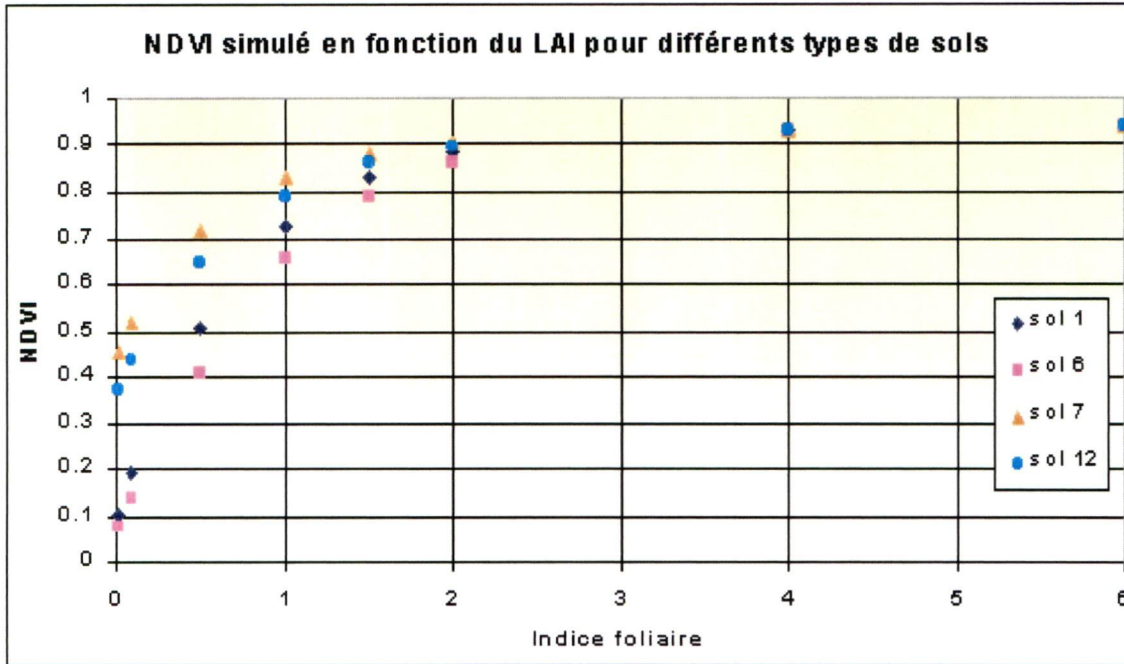
Ainsi, l'indice NDVI n'est pas une quantité physique intrinsèque, mais dépend plutôt des propriétés physiques de la canopée : l'indice foliaire (LAI), les conditions de la végétation et la biomasse. Cet indice a été critiqué pour les raisons suivantes (Carlson *et al.*, 1997) :

- La différence entre le NDVI mesuré à la surface et celui déterminé à partir de l'espace est sensible aux atténuations provoquées par l'atmosphère et les aérosols,
- La sensibilité du NDVI au taux de couverture du sol devient grande lorsque le taux de couverture du sol est situé entre 2 et 3,
- La différence de brillance du sol peut produire des variations du NDVI d'une image à l'autre.

En fait, le NDVI croît presque linéairement avec l'augmentation de l'indice foliaire pour se stabiliser avec les valeurs de LAI élevées. La perte de sensibilité du NDVI, aux changements de LAI à de grandes valeurs, est due à la réflectance provenant de la surface du sol sous-jacent qui est atténuée par la végétation qui recouvre le sol (Carlson et Ripley, 1997).

La figure 7 illustre la relation entre l'indice foliaire et l'indice de végétation NDVI. Les données de ce graphique ont été simulées avec SPECAN (Verhoef, 1984; 1985) (décrit dans une section subséquente) pour divers types de sols. D'après cette figure, il est clair que l'effet du sol est

beaucoup plus important lorsque l'indice foliaire est faible. La dispersion des valeurs de l'indice NDVI est élevée. Dès que  $LAI > 2$ , la dispersion de points diminue et l'indice de végétation NDVI devient indépendant du sol nu.



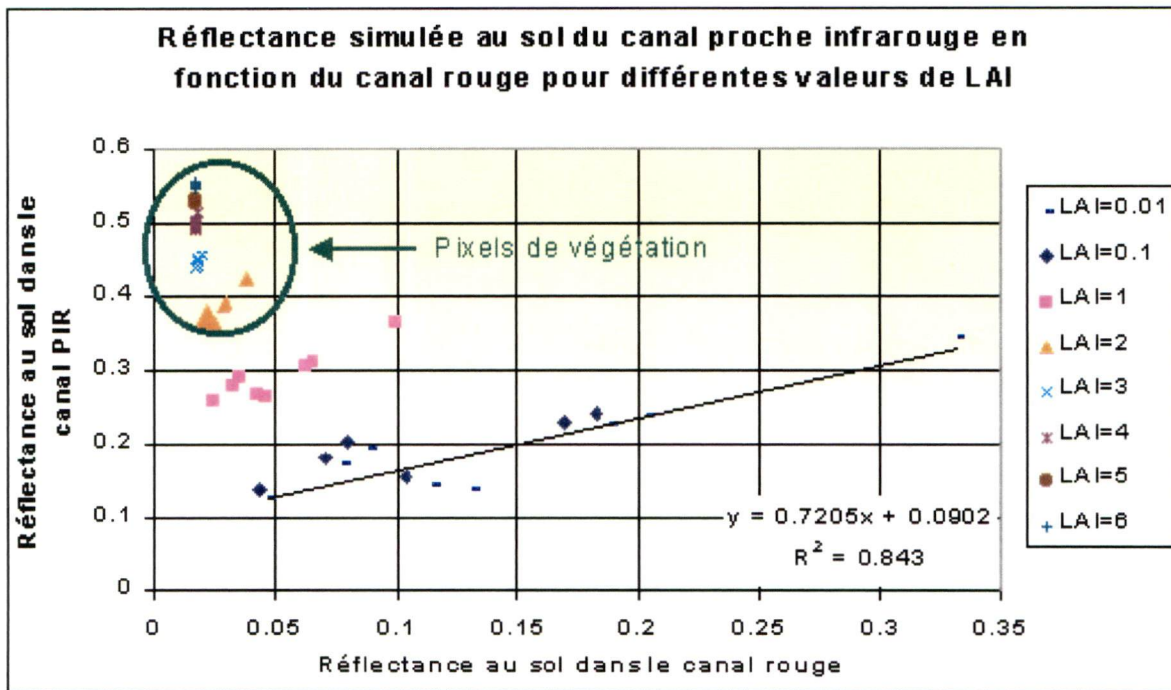
**Figure 7 :** Relation entre l'indice de végétation NDVI et l'indice foliaire.

sol 1 : argile, humide, grossier; sol 6 : argile, sec, moyen; sol 7 : tourbe, humide, grossier; sol 12 : tourbe, sec, moyen

Pour minimiser les effets du sol, Richardson et Wiegand (1977) ont développé une relation qui tient compte de la variation de réflectance des sols. Ils ont remarqué que la réflectance des pixels de sol nu est généralement alignée le long d'une ligne droite représentée dans l'espace proche infrarouge / rouge. Cette observation a permis de développer le concept de la droite des sols nus représenté par :

$$\rho_{PIRsol} = a_{PIR/R} \rho_{Rsol} + b_{PIR/R} \quad (17)$$

Les paramètres  $\rho_{PIRsol}$  et  $\rho_{Rsol}$  sont les réflectances du sol nu du proche infrarouge et du rouge. Les paramètres  $a_{PIR/R}$  et  $b_{PIR/R}$  représentent la pente et l'ordonnée à l'origine respectivement dans l'espace proche infrarouge / rouge et varient légèrement d'un type de sol à l'autre (Baret et Guyot, 1991).\*



**Figure 8 :** Représentation des pixels dans l'espace PIR / R selon la densité de végétation au sol.

Cette droite sépare le sol nu du couvert végétal (Richardson et Wiegand, 1977). La droite est de la forme  $\rho_{PIR} = 0.7205\rho_R + 0.0902$  avec  $R^2 = 0.843$ . Comme le démontre la figure 8, plus l'indice foliaire (donc le taux de couverture végétale) augmente, plus la réflectance dans le proche infrarouge tend à croître et donc plus grande est la distance entre la droite des sols et les pixels de végétation. La distinction entre les pixels de végétation (représentés à une réflectance élevée dans le proche infrarouge) et les pixels de sols nus (représentés par une faible réflectance dans le proche infrarouge) peut alors être facilement effectuée. La pente de la droite des sols nus augmente avec la quantité de végétation présente (Huete *et al.*, 1999).

La droite des sols peut être utilisée pour le calcul d'indice de végétation. En effet, pour tenir compte de l'effet du sol, l'indice *Perpendicular Vegetation Index* (PVI) a été créé par Richardson et Wiegand (1977) et modifié par Jackson *et al.* (1983) (Bannari *et al.*, 1995; Bannari *et al.*, 1996) afin d'utiliser les paramètres de la droite des sols nus.



$$PVI = \frac{\rho_{PIR} - a_{PIR/R}\rho_R - b_{PIR/R}}{\sqrt{a_{PIR/R}^2 + 1}} \quad (18)$$

Où  $\rho_{PIR}$  est la réflectance dans le proche infrarouge,  $\rho_R$  est la réflectance dans le rouge,  $a_{PIR/R}$  est la pente de la droite des sols dans l'espace proche infrarouge / rouge et  $b_{PIR/R}$  est l'ordonnée de cette même droite des sols.

Ainsi, plusieurs indices de végétation ont été développés afin de faire ressortir la contribution spectrale de la végétation et de minimiser la contribution du sol sous-jacent, de l'angle solaire, de la végétation sénescence (Bannari *et al.*, 1995). L'un de ces indices est le SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) développé par Huete (1988) qui introduit un facteur L de façon à réduire l'influence de la brillance du sol. Ce facteur L, qui est fonction de la densité de végétation, peut varier entre zéro et l'infini (Baret et Guyot, 1991).

$$SAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1 + L) \quad (19)$$

Si  $L = 0$ , l'indice SAVI est équivalent au NDVI. Cependant, cet indice possède une solution près des valeurs réelles pour un sol nu, seulement lorsque les paramètres de la droite des sols nus sont  $a_{PIR/R} = 1$  et  $b_{PIR/R} = 0$ , ce qui n'est généralement pas le cas (Baret et Guyot, 1991). Une transformation de l'indice SAVI a été effectuée par Baret *et al.* (1989) afin d'obtenir un indice introduisant les paramètres de la droite des sols nus dans l'espace proche infrarouge / rouge. L'indice TSAVI (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*) tient compte des couverts végétaux de faibles densités :

$$TSAVI = \frac{a_{PIR/R}(\rho_{PIR} - a_{PIR/R}\rho_R - b_{PIR/R})}{(\rho_R + a_{PIR/R}\rho_{PIR} - a_{PIR/R}b_{PIR/R} + X(1 + a_{PIR/R}^2))} \quad (20)$$

Avec  $a_{PIR/R}$  et  $b_{PIR/R}$ , la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols. La première version (Baret *et al.*, 1989) de l'indice TSAVI a été ajustée dans le but de minimiser les effets de brillance du sol en ajoutant un terme X égal à 0.08 (Baret et Guyot, 1991; Bannari, 1996). Selon Baret et

Guyot (1991), l'indice TSAVI est 0 pour des sols nus et est près de 0.70 pour la végétation dense. Lorsque les paramètres de la droite des sols nus sont de  $a_{PIR/R} = 1$  et  $b_{PIR/R} = 0$ , l'indice TSAVI est équivalent au NDVI (Baret et Guyot, 1991).

Parallèlement, Qi *et al.* (1994) ont développé un indice modifié du SAVI, le MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) dans le but d'amoindrir les effets du sol sur l'indice SAVI (Huete et Liu, 1994 ; Bannari *et al.*, 1995; Bannari, 1996):

$$MSAVI = \frac{2\rho_{PIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{PIR} + 1)^2 - 8(\rho_{PIR} - \rho_R)}}{2} \quad (21)$$

Dans le cadre de ce projet, un nouvel indice est proposé afin d'obtenir plus de résistance face aux effets du sol. Il s'agit de l'indice TSAVI<sub>mod</sub> (*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index modified*) (Paré, 2000; Paré, 2001) qui est une modification à l'indice de végétation TSAVI. Celui-ci est élaboré en suivant l'indice TSAVI tel que :

$$TSAVI = \frac{\alpha\rho_{PIR} - \beta\rho_R - \gamma}{\rho_R + \alpha\rho_{PIR} - \gamma + \delta} = \frac{\alpha\rho_{PIR} - \beta\rho_R - \gamma}{\rho_R + \alpha\rho_{PIR} + \eta} \quad (22)$$

$$TSAVI_{mod} = \frac{a_{PIR/R}(\rho_{PIR} - a_{PIR/R}\rho_R) + 10}{\rho_R + a_{PIR/R}\rho_{IR} + 10} \quad (23)$$

Où  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$  sont des constantes. La différence principale est que l'indice TSAVI<sub>mod</sub> utilise seulement la contribution de la pente de la droite des sols nus dans l'espace proche infrarouge / rouge. Ainsi, si la droite des sols nus n'est pas optimisée, seule la pente influencera la valeur de l'indice de végétation.

#### 4.5 L'effet de l'atmosphère

Un signal reçu au capteur dépend de la réflectance de la surface et des perturbations occasionnées par l'atmosphère : l'absorption des gaz, la diffusion et l'atténuation par les molécules et les aérosols. Les effets induits par les molécules et les aérosols dépendent de la longueur d'onde et l'effet des aérosols varie dans le temps et dans l'espace (Kaufman et Sendra, 1988).

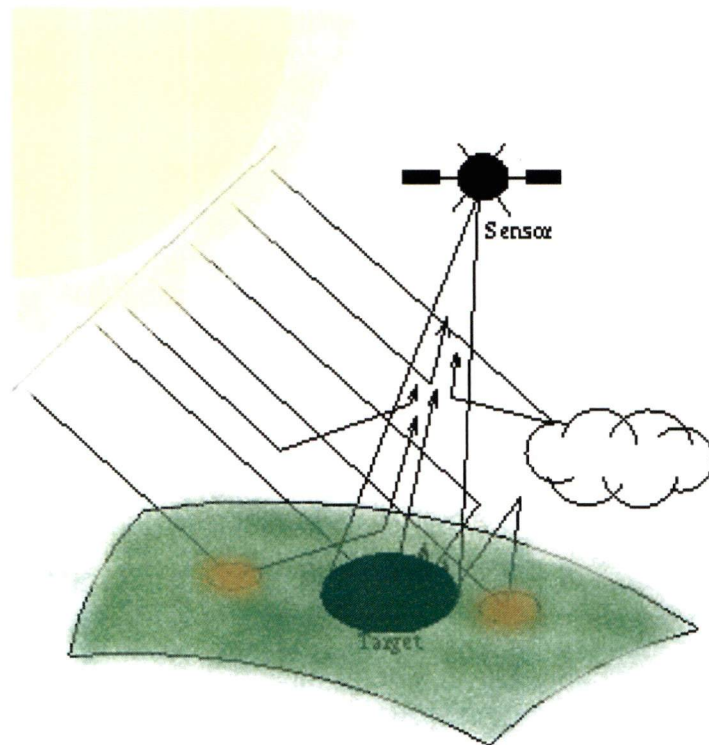
Dans le cas idéal, c'est à dire sans interférence de l'atmosphère, l'éclairement du soleil illuminerait la surface. Une partie des photons serait absorbée par la surface tandis qu'une autre partie des photons serait réfléchi vers le capteur, le signal reçu ne dépendrait alors que de la surface. Cependant, puisque l'atmosphère perturbe le signal, seule une fraction de photons provenant de la cible est retournée au capteur. Les photons manquant ont été absorbés ou diffusés.

La composante intrinsèque à l'atmosphère, soit la réflectance atmosphérique  $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v)$ , n'atteint pas la cible puisque cette composante est rétrodiffusée à partir de l'atmosphère dans la direction du capteur. Elle ne comptera donc pas d'information relative à la cible. La réflectance atmosphérique dépend des conditions géométriques d'éclairement et d'observation, de l'état de l'atmosphère, de la répartition des aérosols, de l'altitude du capteur et de la longueur d'onde.

De plus, d'autres photons interagissent avec l'environnement autour de la cible et sont ensuite diffusés dans la direction du capteur, introduisant des effets d'environnement. Finalement, une certaine partie des photons interagissent successivement avec la surface et l'atmosphère avant d'être réfléchi dans la direction du capteur (Kaufman et Sendra, 1988).

La figure 9 (adaptée de Deschamps *et al.*, 1983) illustre les interactions possibles : réflectance directe provenant de la cible, la réflectance intrinsèque à l'atmosphère, la réflectance causée par l'environnement et la contribution des réflectances multiples surface-atmosphère.





**Figure 9** : Contributions du signal au capteur, d'après Deschamps *et al.*, (1983)

Les effets de l'atmosphère sur le rayonnement se décrivent comme suit (Kaufman, 1988) :

❖ Effet sur la radiation descendante

La radiation solaire descendante est atténuée par l'absorption et la rétrodiffusion dans l'atmosphère. La diffusion intensifie la distribution angulaire de la radiation et fait en sorte que la radiation interagit avec la surface dans plusieurs directions (au lieu de la direction du faisceau solaire).

❖ Effet sur la radiation ascendante

La radiation réfléchie du sol est particulièrement atténuée par l'absorption et la rétrodiffusion causée par l'atmosphère. La diffusion des photons, réfléchi par la surface autour de la cible dans la direction du capteur, amène une contribution des photons provenant de l'extérieur de la région du champ de vue. Par ailleurs, la lumière est également diffuse dans l'atmosphère sans être réfléchi par la surface, ce qui fait en sorte d'éclaircir l'image, particulièrement pour les surfaces foncées.

Trois types de diffusions atmosphériques existent : la diffusion de Rayleigh, la diffusion de Mie et la diffusion non sélective. La diffusion de la lumière par les molécules et les atomes de tailles inférieures à la longueur d'onde (molécules d'oxygène ou d'azote...) est donnée par la diffusion de Rayleigh. Cette diffusion correspond à une loi en  $\lambda^{-4}$  et cause une dispersion des courtes longueurs d'onde. Le rayonnement émis n'est pas le même dans toutes les directions.

La diffusion par les particules de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement (dont le rayon de la cible oscille entre 0.1 et 10 fois la longueur d'onde) (poussière, particules d'eau, de fumée, de pollen...) correspond à la diffusion de Mie. La diffusion de Mie affecte les courtes longueurs d'onde et s'applique seulement lorsque les particules sont sphériques. Elle est caractérisée par une loi en  $\lambda^{-1}$  ( $1 < \tau < 3$ ) (Kaufman, 1988; Kaufman, 1993). La puissance du rayonnement émis est maximale lorsque la longueur d'onde est près du rayon de la particule. Le rayonnement rétro-diffusé est plus grand que le rayonnement diffusé dans la direction de l'onde incidente. Sauf pour les poussières, l'effet des aérosols décroît avec la longueur d'onde (Kaufman, 1993; Kaufman *et al*, 1997) ce qui rend la partie visible du spectre plus sensible que les parties du proche infrarouge et du moyen infrarouge (Kaufman et Tanré, 1996).

Lorsque la taille des particules est supérieure à la longueur d'onde du rayonnement (gouttes d'eau, grosses particules de poussière...) la diffusion non-sélective agit sur toutes les longueurs d'onde. L'absorption moléculaire (ozone, vapeur d'eau...) peut être minimisée par le choix de fenêtres atmosphériques où l'atmosphère est transparente au rayonnement. À cause de sa dépendance spectrale, la diffusion atmosphérique affecte les caractéristiques du spectre de la végétation et par le fait même les indices de végétation (Kaufman, 1988).

D'après Kaufman et Sendra (1988), pour une surface uniforme, l'effet d'une atmosphère sans nuage est de rendre sombre une surface brillante (sable et végétation dans le proche infrarouge) et de rendre brillante une surface sombre (eau et végétation dans la partie visible du spectre). La diffusion atmosphérique entraîne une augmentation de la luminance tandis que l'atténuation (redirection des photons par la diffusion ou l'absorption des photons) cause une réduction de la luminance (Kaufman et Tanré, 1996).

Pour une surface non-uniforme, l'atmosphère réduit les variations spatiales de la réflectance ascendante (Kaufman et Sendra, 1988). La réduction est causée par la diffusion des photons qui sont réfléchis par une surface brillante dans le champ de visée d'une surface sombre. Les effets atmosphériques sont plus importants dans la bande rouge que dans la bande du proche infrarouge sur des surfaces de faibles réflectances (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré, 1996; Hu *et al.*, 1998) parce que ceux-ci s'atténuent au fur et à mesure que la longueur d'onde augmente. Ceci entraîne une augmentation de la réflectance dans le canal rouge due à la dispersion du signal ascendant. L'atmosphère entraîne une diminution de la réflectance dans le canal du proche infrarouge (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré, 1996) due à l'atténuation atmosphérique associée à la dispersion et l'absorption par la vapeur d'eau (Huete *et al.*, 1999). Pour les grandes longueurs d'onde ( $\lambda > 1.0\mu\text{m}$ ) c'est l'absorption dans l'atmosphère qui prédomine (Myneni et Asrar, 1994). De surcroît, les effets atmosphériques s'intensifient avec l'épaisseur optique des aérosols et la réflectance d'une surface apparente au capteur est alors très différente de sa valeur originale (Hu *et al.*, 1998).

Afin d'avoir un indice de végétation indépendant des effets atmosphériques, Kaufman et Tanré (1992) ont développé l'indice ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*). L'introduction du canal hybride ( $\rho_{RB}$ ), qui combine le canal rouge et le canal bleu ainsi qu'un facteur d'ajustement (noté  $\gamma$ ), minimise les effets de la diffusion atmosphérique causés par les aérosols dans le canal rouge et l'atténuation dans le canal proche infrarouge (Kaufman et Tanré, 1992; Huete *et al.*, 1994; Bannari *et al.*, 1995). L'indice ARVI est donné par :

$$ARVI = \frac{\rho_{PIR}^* - \rho_{RB}^*}{\rho_{PIR}^* + \rho_{RB}^*} \quad (24)$$

avec

$$\rho_{RB}^* = \rho_R^* - \gamma(\rho_B^* - \rho_R^*) \quad (25)$$

Si  $\gamma = 1$

$$\rho_{RB}^* = 2\rho_R^* - \rho_B^* \quad (26)$$



Où  $\gamma$  est un facteur d'ajustement,  $\rho_{PIR}^*$ ,  $\rho_{RB}^*$ ,  $\rho_R^*$  et  $\rho_B^*$  sont les réflectances apparentes dans les canaux proche infrarouge, hybride, rouge et bleu respectivement.

Si  $\gamma = 0$ , l'indice ARVI est égale à la valeur du NDVI apparent au capteur et  $\gamma = 1$  minimise les effets atmosphériques lorsque le modèle des aérosols n'est pas connu (Kaufman et Tanré 1992). Selon Kaufman et Tanré (1992), pour plusieurs conditions atmosphériques, l'indice de végétation ARVI est environ quatre fois moins sensible que l'indice de végétation NDVI aux effets atmosphériques et ce, particulièrement au-dessus de couverts végétaux. Par ailleurs, les indices ARVI et NDVI ne sont pas équivalents numériquement mais plutôt reliés linéairement (Kaufman et Tanré, 1992). La résistance aux effets atmosphériques dépend du type de surface et des propriétés radiatives de l'atmosphère. Ainsi, bien que cet indice permette de minimiser les effets de l'atmosphère, il reste sensible aux types de couverts végétaux (Kaufman et Tanré, 1996; Bannari *et al.*, 1997). Par ailleurs, certains effets atmosphériques résiduels résistent à l'utilisation de l'indice ARVI notamment sous des conditions d'atmosphère de type turbide (Myneni et Asrar, 1994).

Ainsi, l'indice ARVI peut être associé à l'indice SAVI (Kaufman et Tanré, 1992; Huete et Liu, 1994) afin d'obtenir un indice qui soit résistant à la fois aux effets atmosphériques et aux effets du sol sous-jacent à la végétation. Le SARVI (*Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index*) (Kaufman et Tanré, 1992) et le MSARVI (*Modified Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index*) (Kaufman et Tanré, 1992) corrigent à la fois des effets du sol et du bruit atmosphérique (Huete *et al.*, 1994) :

$$SARVI = \frac{(\rho_{PIR}^* - \rho_{RB}^*)}{(\rho_{PIR}^* + \rho_{RB}^* + L)}(1 + L) \quad (27)$$

$$MSARVI = \frac{2\rho_{PIR}^* + 1 - \sqrt{(2\rho_{PIR}^* + 1)^2 - 8(\rho_{PIR}^* - \rho_{RB}^*)}}{2} \quad (28)$$

Selon Myneni et Asrar (1994) l'indice SARVI minimise les effets du sol sous-jacent mais semble plus sensible aux effets de l'atmosphère que l'indice ARVI.

Huete et Liu. (1994) (et repris par Bannari *et al.*, 1994) ont combiné les caractéristiques et les avantages des indices qui tiennent compte de l'effet du sol et de l'effet de l'atmosphère. Il s'agit d'une combinaison des indices ARVI et TSAVI pour donner l'indice TSARVI (*Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index*). Dans cet indice, le canal rouge est remplacé par le canal hybride rouge-bleu et la droite des sols est définie dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride (Bannari *et al.*, 1994, Bannari, *et al.*, 1995). La contribution du canal hybride à cette droite des sols nus amène une résistance aux effets atmosphériques (*Soil Line Resistant to Atmospheric effects*, Bannari *et al.*, 1994).

$$\rho_{PIRsol}^* = a_{PIR / RB} \rho_{RBsol}^* + b_{PIR / RB} \quad (29)$$

Ce qui permet de définir l'indice TSARVI :

$$TSARVI = \frac{a_{PIR / RB} (\rho_{PIR}^* - a_{PIR / RB} \rho_{RB}^* - b_{PIR / RB})}{\rho_{RB}^* + a_{PIR / RB} \rho_{PIR}^* - a_{PIR / RB} b_{PIR / RB} + 0.08(1 + a_{PIR / RB}^2)} \quad (30)$$

Où  $\rho_{PIRsol}^*$  et  $\rho_{RBsol}^*$  sont les réflectances apparentes du sol nu dans le canal proche infrarouge et hybride du spectre,  $a_{PIR / RB}$  et  $b_{PIR / RB}$  sont la pente et l'origine de la ligne de régression entre les réflectances apparentes dans l'espace apparent proche infrarouge / rouge-bleu.

En principe, cet indice caractérise la végétation éparse et moyennement dense dans les milieux hétérogènes, indépendamment des effets des sols nus, des variations spatio-temporelles de l'atmosphère et des caractéristiques du capteur (Bannari *et al.*, 1994, Bannari *et al.*, 1995, Bannari *et al.*, 1998).

L'indice TSARVI sera modifié dans ce projet afin de devenir le nouvel indice ATI (*Atmospheric Index*) (Paré, 2000; Paré, 2001). L'indice ATI inclut les canaux proche infrarouge et hybride afin

de réduire les effets de l'atmosphère. Contrairement à l'indice TSARVI, il utilise seulement la pente de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride, ce qui minimise la dépendance de l'indice à une mauvaise approximation de la droite des sols nus. Cet indice est élaboré selon l'indice TSARVI tel que :

$$TSARVI = \frac{\alpha \rho_{PIR}^* + \beta \rho_{RB}^* - \gamma}{\rho_{RB}^* + \alpha \rho_{PIR}^* - \gamma + \delta} = \frac{\alpha \rho_{PIR}^* + \beta \rho_{RB}^* - \gamma}{\rho_{RB}^* + \alpha \rho_{PIR}^* + \eta} \quad (31)$$

$$ATI = \frac{a_{PIR/RB}(\rho_{PIR}^* - a_{PIR/RB}\rho_{RB}^*) + 10}{\rho_{RB}^* + a_{PIR/RB}\rho_{PIR}^* + 10} \quad (32)$$

Où  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$  sont des constantes  $\rho_{PIR}^*$  et  $\rho_{RB}^*$  sont les réflectances apparentes dans le canal proche infrarouge et le canal hybride et  $a_{PIR/RB}$  et  $b_{PIR/RB}$  les paramètres de la droites des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride. La région du spectre comprise entre 0.9 et 2.5  $\mu m$  est principalement dominée par l'absorption de l'eau.

Le EVI (*Enhanced Vegetation Index*) a été développé par Huete *et al.* (1999). Cet indice est une modification du NDVI et incorpore un facteur d'ajustement L et deux coefficients  $C_1$  et  $C_2$  qui décrivent l'utilisation de la bande bleu dans la correction de la bande rouge pour la dispersion des aérosols :

$$EVI = \frac{\rho_{PIR}^* - \rho_R^*}{\rho_{PIR}^* + C_1 \rho_R^* - C_2 \rho_B^* + L} (1 + L) \quad (33)$$

Où  $\rho_B^*, \rho_R^*$  et  $\rho_{PIR}^*$  sont les réflectances apparentes dans les canaux bleu, rouge et proche infrarouge,  $C_1$ ,  $C_2$  et L sont empiriquement déterminés comme 6.0, 7.5 et 1.0 respectivement (Huete *et al.*, 1999). Cet indice a été développé pour corriger les effets atmosphériques sur les images MODIS.



Le NDWI (*Normalized Difference Water Index*), créé par Gao (1996), est une mesure de l'eau dans la végétation qui interagit avec la radiation solaire. L'apport de la bande spectrale du moyen infrarouge à l'indice de végétation réduit sa dépendance aux effets de l'atmosphère.

$$NDWI = \frac{\rho_{PIR}^* - \rho_{MIR}^*}{\rho_{PIR}^* + \rho_{MIR}^*} \quad (34)$$

Selon Gao (1996), cet indice est positif pour la végétation foncée parce que l'absorption de l'eau dans la bande spectrale du moyen infrarouge est faible. Pour les sols nus, parce que la réflectance dans le moyen infrarouge est supérieure à la réflectance dans le proche infrarouge, l'indice NDWI devrait être négatif. Bien que les effets atmosphériques soient faibles sur le NDWI, il est légèrement sensible aux effets du sol sous-jacent.

#### 4.6 Masque de nuages

La présence de nuages empêche de distinguer les pixels au sol à partir d'un capteur satellitaire dans les bandes spectrales du visible et de l'infrarouge (en général, au fur et à mesure que la longueur d'onde augmente, les bandes spectrales deviennent transparentes à l'atmosphère). Parce que les pixels de sols clairs peuvent parfois être interprétés comme étant des pixels de nuages, un masque est alors nécessaire afin d'éliminer les pixels nuageux qui contaminent les données. Selon Lissens *et al.* (1999), deux variables peuvent permettre l'interprétation d'un pixel clair, nuageux ou incertain. Cette distinction des pixels se fait à l'aide de deux bandes spectrales précises, soit l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et le bleu (noté en compte numérique « CN » des bandes de SPOT 4 VEGETATION; le capteur est décrit dans une section subséquente) (Lissens *et al.*, 1999).

- Un pixel est déclaré clair si :

$$CN_B < 493 \quad \text{ou} \quad CN_{mir} < 180 \quad (35)$$

- Un pixel est déclaré nuageux si :

$$CN_B \geq 720 \text{ et } CN_{\text{mir}} \geq 320 \quad (36)$$

- Un pixel est déclaré incertain si :

Il n'est pas déclaré clair ou nuageux par les deux règles précédentes.

## 5. Méthodologie

Tel que mentionné précédemment, l'objectif du projet est d'extraire l'épaisseur optique des aérosols au-dessus de couverts végétaux dont les caractéristiques ne sont pas connues à priori et ce, à partir d'indice de végétation. Le modèle ATIM (*Atmospheric Index Model*, décrit dans une section subséquente) sera testé avec différents indices de végétation, par des simulations théoriques avec les indices de végétation ARVI, TSARVI et ATI apparents au capteur de même que les indices de végétation NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> au sol. Les applications sur les images satellitaires s'effectueront à l'aide des nouveaux indices ATI et TSAVI<sub>mod</sub>. Les indices de végétation apparents au capteur se calculent à l'aide des réflectances apparentes (extraites des produits P et décrites dans une section subséquente) tandis que les indices de végétation au sol seront calculés par itération à partir d'un modèle de transfert radiatif. L'épaisseur optique des aérosols est obtenue lorsque la valeur d'indice apparent simulé est égale à l'indice de végétation mesuré au capteur.

Le travail se divisera en deux parties :

1. Une analyse théorique pour confirmer la faisabilité de la méthode à partir d'un jeu de données simulées et quantification du seuil de précision selon le type de couverture au sol. L'organigramme méthodologique des simulations théoriques figure en annexe 1 et le modèle d'inversion ATIM est défini à l'annexe 2 .

- ❖ Simulation des réflectances au sol.
- ❖ Simulation des réflectances apparentes au capteur pour différentes concentrations en eau, épaisseurs optiques des aérosols et pour une atmosphère de type continentale.
- ❖ Détermination des droites des sols nus dans l'espace proche infrarouge / rouge et dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride.
- ❖ Calcul des indices de végétation au sol et apparents.
- ❖ Élaboration des relations reliant les indices au sol (NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub>) et les indices apparents au capteur (ARVI, TSARVI et ATI).
- ❖ Détermination de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm pour divers modèles (annexe 2).
- ❖ Comparaison des modèles d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm utilisant les indices de végétation (ARVI, TSARVI, ATI, NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub>) avec le modèle de sélection de pixels foncés.

Par ailleurs, l'algorithme d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols ATIM sera testé de sorte à vérifier l'influence de certains facteurs tels que la variation de l'angle de visée et le changement de type d'aérosols (aérosols de type urbain et désertique).

2. Cette approche sera appliquée aux données du capteur SPOT 4 VEGETATION (décrit dans une section subséquente) et validée par comparaison avec des mesures de l'épaisseur optique des aérosols acquises par les photomètres solaires simultanée aux images satellitaires. Le modèle ATIM est détaillé à la figure en annexe 2.

- ❖ Calcul de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride.
- ❖ Calcul des indices de végétation apparents au capteur à partir des réflectances apparentes des images.
- ❖ Extraction de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm à l'aide du modèle ATIM
- ❖ Comparaison du modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm en utilisant le modèle ATIM avec le modèle de sélection de pixels foncés et validation avec les données provenant des photomètres solaires.



- ❖ Extraction de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm à l'aide du modèle ATIM et interpolation des valeurs d'épaisseur optique à 550nm.
- ❖ Comparaison des images non-interpolées et interpolées avec les images de feux de forêt AVHRR.

Finalement, afin de quantifier les limites du modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols, l'algorithme sera appliqué sur des images d'une région du Sahel, plus précisément au Burkina Faso (Afrique).

Les parties suivantes décrivent les diverses étapes effectuées lors des simulations théoriques et de l'application aux images satellitaires.

### 5.1 Simulations théoriques

Trois modèles sont utilisés pour les simulations théoriques. Premièrement, le modèle SPECAN (Verhoef, 1984; 1985) sert aux calculs des réflectances au sol selon des paramètres distincts. Deuxièmement, le modèle de transfert radiatif CAM5S (*Canadian Advanced Modified Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (O'Neill *et al.*, 1996; Tanré *et al.*, 1990) sert aux calculs des réflectances apparentes au capteur ainsi qu'à certaines extractions de l'épaisseur optique des aérosols, particulièrement celles faisant intervenir les pixels foncés. Finalement, le modèle SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Correction*) (Rahman et Dedieu, 1994) est aussi utilisé pour calculer les réflectances apparentes. Comme le modèle de transfert radiatif SMAC est beaucoup plus rapide d'exécution que le modèle CAM5S, c'est celui-ci qui sera utilisé lors de certaines extractions de l'épaisseur optique des aérosols à partir des indices de végétation. Le type d'atmosphère utilisé dans les simulations théoriques est continental. Parce que c'est ce type d'atmosphère qui caractérise le mieux la région d'étude.

- ❖ Le modèle SPECAN permet d'évaluer la radiation solaire par le système Terre-Surface. Ce modèle prend en compte trois autres modèles de calcul. Le modèle SOIL (Pinty *et al.*, 1989) détermine les propriétés du sol dont les réflectances bihémisphérique, direct / hémisphérique et bidirectionnelle du sol sous-jacent à la canopée. Le modèle PROSPECT (Verhoef, 1984; 1985) est un modèle de transfert radiatif et permet de déterminer les constantes optiques de plusieurs types de feuilles. Finalement, un autre modèle de transfert radiatif est utilisé, le modèle SAIL (Verhoef, 1984; 1985) pour modéliser le comportement optique d'une canopée. La simulation de spectres de réflectance d'une canopée se fait à partir de différents paramètres foliaires tels que la structure interne du mésophylle (c'est à dire le tissu chlorophyllien fondamental de l'intérieur de la feuille) ainsi que le contenu des feuilles en chlorophylle et en eau. Le modèle SPECAN tient compte également des paramètres de structure de la canopée tels que l'indice foliaire et l'angle moyen d'inclinaison des feuilles. Finalement il intègre les paramètres relatifs à la géométrie de visée et d'éclairement, à la diffusion atmosphérique et au type de sol.
  
- ❖ Le code CAM5S (O'Neill *et al.*, 1996; Tanré *et al.*, 1990) évalue la radiation solaire qui est retournée au capteur par le système Terre-Surface-Atmosphère en utilisant les sorties de SPECAN comme *input* (entrées) à la surface. Ce modèle tient compte des effets d'absorption par les gaz (ozone, vapeur d'eau, oxygène, dioxyde de carbone) et des effets de diffusion par les aérosols (diffusion de Mie) et par les molécules (diffusion de Rayleigh).
  
- ❖ Le code SMAC (Rahman et Dedieu, 1994) retrouve la valeur de réflectance au sol. Ce modèle est efficace pour traiter un grand nombre de données à la fois, à cause de sa rapidité d'exécution. Cette approche est basée sur un système d'équations ayant des coefficients propres à chacune des bandes spectrales du capteur. Les équations du code sont celles décrivant le transfert radiatif dans l'atmosphère (Rahman et Dedieu, 1994). Le code SMAC tient compte de l'épaisseur optique des aérosols, de l'albédo de l'atmosphère, du facteur d'asymétrie et de la fonction de phase. Ce code sera principalement employé lors de l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols sur les images satellitaires.

La première partie du travail consiste à faire des simulations théoriques des valeurs de la réflectance au sol et de la réflectance apparente au capteur pour différentes caractéristiques de la surface et de l'atmosphère. La simulation est effectuée pour certains types de sol (caractérisés selon les attributs : type, humidité, taille du grain): *clay, wet, rough* (argile, humide, grossier : **sol 1**); *clay, dry, median* (argile, sec, moyen : **sol 6**); *peat, wet, rough* (tourbe, humide, grossier : **sol 7**); *peat, dry, median* (tourbe, sec, moyen : **sol 12**) et pour différents taux de la couverture du sol exprimant le couvert d'un sol nu ( $LAI = 0.01$ ) jusqu'à un couvert complet ( $LAI = 6$ ).<

Le tableau 2 illustre les paramètres utilisés lors de la simulation des réflectances au sol avec SPECAN. Les termes entre parenthèses signifient l'étendue possible pouvant être employée. Cependant, la plupart des termes ont été calculé selon une moyenne (paramètres déterminés dans la colonne « Valeur utilisée »).

**Tableau 2** : Paramètres utilisés pour la simulation des réflectances au sol

Paramètres	SPECAN (échelle unités)	Valeur utilisée
VAI	Structure interne du mésophylle (1 à 2.5)	1.7
CAB	Contenu des feuilles en pigments chlorophylliens (1 à 100 mg / cm <sup>2</sup> )	80
CW	Contenu en eau des feuilles (0.001 à 0.05 g / cm <sup>2</sup> )	0.025
LAI	Indice foliaire (ou taux de couverture végétal) (~0 à ~6)	Variable
LAD	Angle moyen d'inclinaison des feuilles (0 à 90°)	45
$\theta_s$	Angle zénithal solaire (°)	30
$\theta_v$	Angle zénithal de visée (°)	0
$\phi_v$	Angle azimutal de visée (°)	0
SKYL	Paramètre relatif à la diffusion atmosphérique (0 à 1)	0
Sol	Type de sol	Variable



Il est à noter que le paramètre relatif à la diffusion atmosphérique (SKYL) fait référence à la diffusion et s'exprime comme étant la fraction d'éclairement incident diffus sur l'éclairement incident total :

$$SKYL = \frac{E_{diffus}}{E_{total}} \quad (37)$$

Les paramètres sont fixés à des valeurs moyennes sauf pour le type de sol et l'indice foliaire (LAI) qui varieront à chacune des simulations. Pour faire ressortir les caractéristiques de la végétation, le contenu des feuilles en pigments chlorophylliens est placé à une valeur élevée.

Par la suite, les réflectances apparentes au capteur sont calculées à l'aide du modèle de transfert radiatif CAM5S. À partir des valeurs de réflectance au sol obtenues précédemment, il est possible de faire une simulation des réflectances apparentes en faisant varier la concentration en eau (1.42, 2.0 et 4.0 g/cm<sup>2</sup>) ainsi que les valeurs de visibilités ( $v = 5, 10, 23, 50$  et 100 km). Les bandes spectrales utilisées sont celles de SPOT 4 VEGETATION (décrit dans une section subséquente) dans le bleu (0.395 à 0.500  $\mu\text{m}$ ), le rouge (0.575 à 0.68  $\mu\text{m}$ ), le proche infrarouge (0.78 à 0.89  $\mu\text{m}$ ) et l'infrarouge de courtes longueurs d'onde (1.58 à 1.75  $\mu\text{m}$ ). Le calcul du canal hybride est effectué pour plusieurs facteurs d'ajustement ( $\gamma = 1.5, 1.0, 0.75, 0.5, 0.4$  et 0.3). Les droites des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride et proche infrarouge / rouge permettent d'avoir la pente et l'ordonnée à l'origine. Ces paramètres seront utilisés pour les calculs des indices de végétation TSARVI et ATI apparent au capteur, de même que pour les indices TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> au sol.

Les aérosols sont de type continental et fait référence à la climatologie générale des aérosols (D'Almeida *et al.*, 1991; Soufflet, 1992). Le type d'aérosols est défini à partir des composants de base poussière (70% du volume), d'eau soluble (29% du volume) et de suie (1% du volume) (Soufflet, 1992). On fait l'hypothèse que la surface est uniforme, Lambertienne et qu'elle est constante dans le temps. La végétation est donc stable dans le temps et elle ne présente pas d'effets directionnels puisque les données sont principalement enregistrées à la verticale (dans la direction opposée au soleil) (Soufflet, 1992).

Les modèles DDV et ATIM seront appliqués à partir des réflectances simulées. Ces deux modèles seront ensuite comparés afin de vérifier leur limite au taux de couverture végétal. Le modèle d'atmosphère utilisé dans le code de transfert radiatif CAM5S est un modèle standard pour les États-Unis (US Standard 62) (Mc Clatchey *et al.*, 1971).

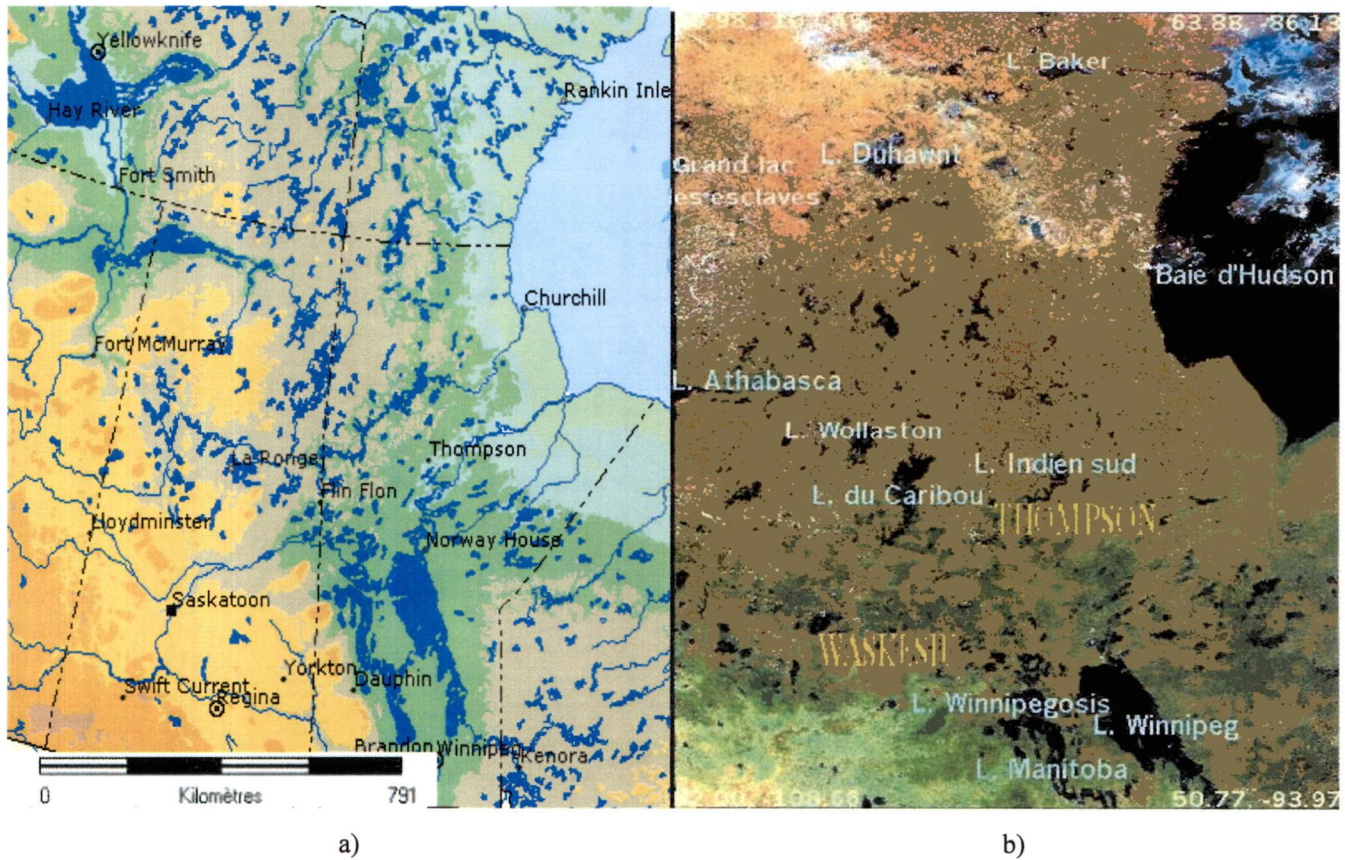
## 5.2 Applications aux images satellitaires

Dans le même ordre d'idées, la deuxième partie porte sur l'analyse d'images satellitaires couvrant les régions de Thompson (55.47 N; 97.50 W) au Manitoba et de Waskasiu (53.55 N; 106.04 W) près de Prince Albert en Saskatchewan (Canada) illustrées à la figure 10. Ces deux régions se trouvent sur le site d'étude BOREAS (*Boreal Ecosystem-Atmosphere Study*) (Landis et Hall, 1999), plus précisément aux sites *Northern Study Area* (NSA) et *Southern Study Area* (SSA) respectivement. Le projet BOREAS est à un regroupement à grande échelle d'étude sur les interactions de la climatologie et des écosystèmes sur la forêt boréale. Son but est d'améliorer la compréhension de la forêt boréale – comment la forêt interagit avec l'atmosphère, quelle quantité de CO<sub>2</sub> peut s'y accumuler, comment le changement climatique l'affecte, etc. En annexe 3, à la page 151, se trouve la classification de la région d'étude.

Le site NSA (100 km par 80 km) se situe près de la limite nord de la forêt boréale. Le site est à environ 780 km au nord du site SSA. Cette région comporte quelques lacs et est principalement couverte d'épinettes noires, de bouleaux et de quelques pins. Les arbres sont de tailles inférieures que ceux du SSA. Les épinettes sont localisées sur des sites possédant du lichen sec, des tourbières et occasionnellement sur des surfaces plus rocheuses. Il y a très peu de trembles, parce que cette région est plate et que le drainage est faible.

Le site SSA (130 km par 90 km) se situe près de la limite sud de la forêt boréale et possède différents types de sols. La partie à l'est possède un mélange de forêt boréale et de bois mixte. Deux principales zones de végétation sont présentes, une section de bois mixte et une section de trembles. Le tremble se retrouve en grande partie sur les hauts plateaux tandis que les épinettes noires sont situées dans une zone où le drainage est faible. Les pins se retrouvent où le sol est sablonneux ou lorsqu'il est bien drainé.

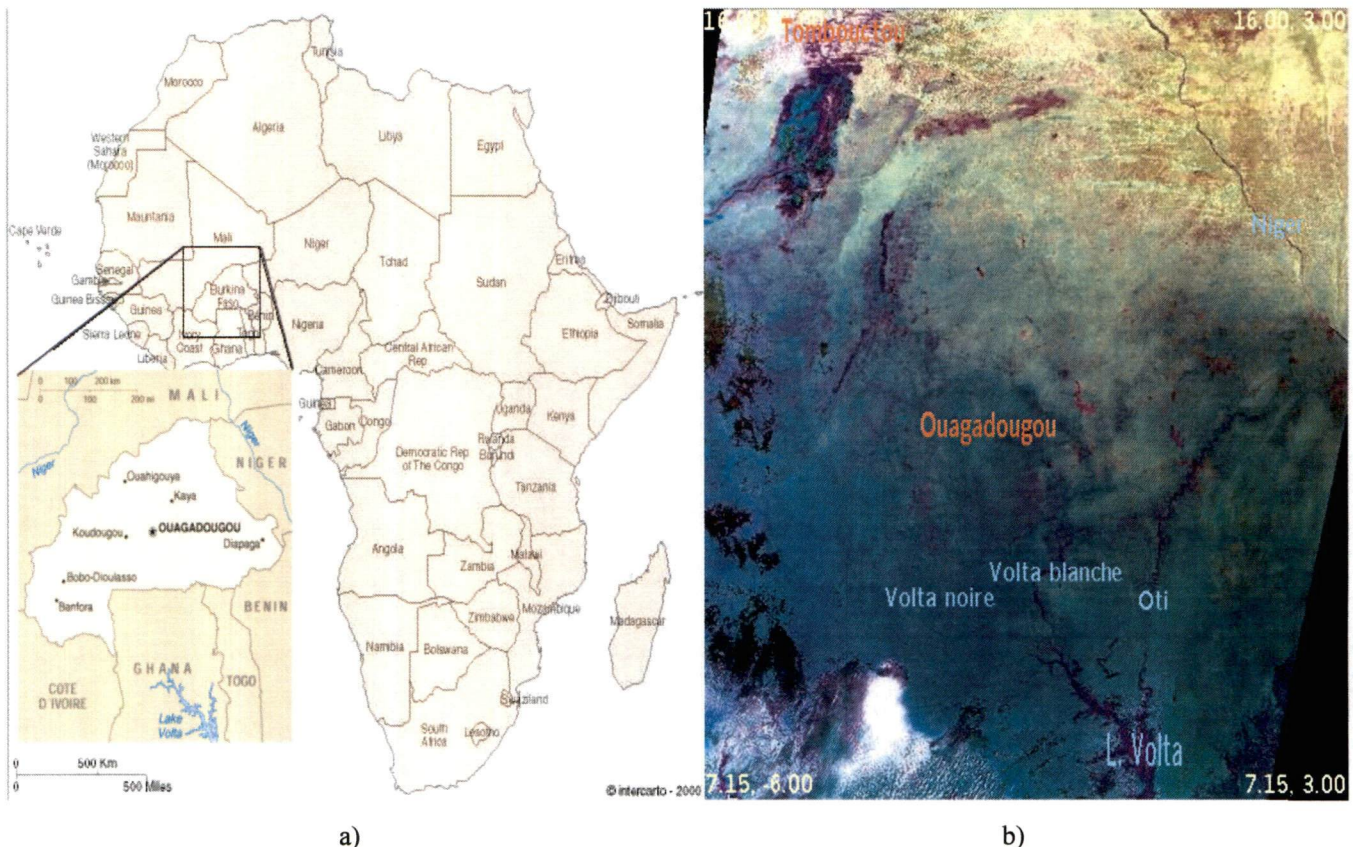




**Figure 10 : Région d'étude, sites de Thompson et Waskesiu**  
a) Encadré de la région d'étude, Canada (L'atlas national du Canada)  
b) Synthèse temporelle par maximum de NDVI de la région d'étude (images SPOT 4 VGT)

Le modèle ATIM est également appliqué sur des images du Burkina Faso (Afrique), plus précisément sur le site de Ouagadougou (12.22 N; 1.33 W). La zone sahélienne, au nord, se caractérise par une pluviométrie faible ( $< 600\text{mm}$ ), des températures élevées ( $> 29.5^\circ\text{C}$ ) et une végétation d'arbustes épineux. La zone centrale, comporte les régions sahélo-soudanienne et soudanienne et se caractérise par une pluviométrie moyenne (entre  $600\text{mm}$  et  $900\text{mm}$ ) et une végétation dominée par les espèces sahéliennes, soit une grande savane, des forêts claires et un important secteur agricole. La zone soudano-guinéenne, au sud, possède des savanes et des îlots de forêts denses et sèches. La pluviométrie moyenne de cette zone est élevée ( $> 900\text{mm}$ ). La figure 11 illustre cette région d'étude.





**Figure 11 : Région d'étude, site Ouagadougou**

a) Encadré de la région du Burkina Faso, Afrique (The World Factbook 2001)

b) Synthèse temporelle par maximum de NDVI de la région d'étude (images SPOT 4 VGT)

Les images satellitaires utilisées dans ce projet sont celles de SPOT 4. Le système SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) a été conçu par le Centre National d'Études Spatiales. Lancé en mars 1998, le satellite a une espérance de vie est supérieure à 5 ans. Il possède une orbite polaire, circulaire, héliosynchrone et phasée par rapport à la Terre.

Le capteur VEGETATION est embarqué sur SPOT 4 (nommé SPOT 4 VGT) pour observer l'évolution de l'environnement à long terme au niveau régional et mondial (Durpaire *et al.*, 1995). Il possède 4 bandes spectrales et une résolution de 1 km ce qui caractérise des couverts végétaux dans le visible, le proche et l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et ce, sur toute la surface du globe. Le tableau 3 résume les caractéristiques de SPOT 4 VGT.

Deux types de produits standards sont définis : les produits P et les produits S. Le premier produit correspond à des données où les erreurs radiométriques sont corrigées (perturbations sur les différents canaux, étalonnage des détecteurs en ligne pour chaque bande spectrale). Les produits S correspondent aux données des produits P entièrement corrigées géométriquement et radiométriquement.

**Tableau 3 : Caractéristiques du capteur VEGETATION de SPOT 4**

<b>Caractéristiques du capteur VEGETATION de SPOT 4</b>	
Altitude à l'équateur	822 km
Nombre de révolution par jour	14+5/26
Révolution par cycle	369
Résolution au sol	1 km au nadir
Fauchée	2250 km
Modes spectraux Bandes spectrales correspondantes	<u>Mode multispectral</u> B0 0.43 – 0.47µm B2 0.61 - 0.68µm B3 0.79 - 0.89µm ICL 1.58 - 1.75µm

La validation des résultats se fait avec les valeurs acquises en temps réel de l'épaisseur optique des aérosols (mesurée pour différentes longueurs d'onde et ramenée à 550nm) par le réseau canadien AEROCAN (réseau de photomètres solaires canadiens, O'Neill *et al.*, 1993; Fedosejevs *et al.*, 2000) et le réseau AERONET (AErosol Robotic NETwork, Holben *et al.*, 1998; Holben *et al.*, 2000; Fedosejevs *et al.*, 2000). Il s'agit de réseaux de photomètres solaires de type CIMEL<sup>TM</sup> CE-318 servant entre autre à l'extraction de l'épaisseur optique sur une base continue à travers le Canada et plusieurs autres sites répartis sur le globe. Les instruments CIMEL enregistrent des données des radiances du ciel et du soleil dans huit bandes spectrales (340, 380, 440, 500, 670, 870, 940, 1020nm). Des analyses de sensibilité ont montré que l'incertitude produit une erreur absolue dans les réflectances de surfaces de moins de 2% pour différents types de couverture végétale (Fedosejevs *et al.*, 2000).



### **5.2.1 Méthode de calcul de la droite des sols nus**

Afin que les indices de végétation soient corrélés à l'image, il est important d'obtenir une droite des sols nus exclusive pour chacune des images satellitaires. Ainsi, en calculant cette droite des sols nus à partir des réflectances apparentes au capteur, toute image possédera une droite indépendante.

Une comparaison de chacun des pixels de l'image entière dans les bandes de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et du proche infrarouge est effectuée parce que l'apport de la bande spectrale de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde contribue à la caractérisation des couverts végétaux (Baret et Andrieu, 1999). En effet, la réflectance des sols nus se caractérise par une grande sensibilité à l'humidité et par des réflectances élevées dans l'infrarouge de courtes longueurs d'onde. Ce domaine spectral est donc sensible aux variations du couvert végétal, en particulier pour des couverts peu denses, ce qui rend cette bande utile pour la discrimination des sols nus. Le critère principal de sélection des pixels satisfaisants à la conception de la droite des sols nus est le suivant : si la valeur de la réflectance apparente au capteur de la bande de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde est supérieure à celle du proche infrarouge, alors il s'agit probablement d'un pixel où la végétation n'est pas prédominante. Si par contre la végétation devient plus importante, la réflectance dans le canal proche infrarouge s'intensifiera jusqu'à devenir supérieure à la réflectance de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde.

### **5.3 Modèles d'inversion**

Cette partie introduit les modèles d'inversion utilisant les relations linéaires entre les indices de végétation apparents au capteur et les indices de végétation obtenus au sol (basée sur les travaux de Kaufman et Tanré), ainsi que le modèle DDV servant de modèle de validation et de comparaison.



### 5.3.1 Modèle d'inversion basé sur les indices de végétation : ATIM

La méthode ATIM est fondamentalement basée sur le travail de Kaufman et Tanré. Ceux-ci ont démontré que l'estimation de l'indice apparent au capteur ARVI était aussi sensible que le NDVI au couvert végétal mais significativement moins sensible aux variations atmosphériques. Le développement de la méthode ATIM passe par une étape fondamentale qui consiste à définir, à partir de données simulées, une fonction entre un indice apparent au capteur et un indice au sol. Cette fonction minimise les effets de l'atmosphère. Les indices de végétation NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> sont sensibles aux effets atmosphériques. Par contre, les indices de végétation ARVI, TSARVI et ATI, qui utilisent le canal proche infrarouge et une combinaison des canaux bleu et rouge, sont moins sensibles que les indices précédents aux effets de l'atmosphère. Le modèle ATIM utilise les relations suivantes :

$$ARVI = c_1 \times NDVI + c_2 \quad (38)$$

$$TSARVI = c_3 \times NDVI + c_4 \quad (39)$$

$$ARVI = c_5 \times TSAVI + c_6 \quad (40)$$

$$TSARVI = c_7 \times TSAVI + c_8 \quad (41)$$

$$ATI = c_9 \times TSAVI_{mod} + c_{10} \quad (42)$$

Où les indices  $c_x$  sont des paramètres constants de régression pour les diffusogrammes de points produits dans les conditions de simulations. Ces coefficients sont supposés indépendants de la visibilité (en conséquence de l'épaisseur optique des aérosols) étant donné que les indices ARVI, TSARVI et ATI sont résistants à l'atmosphère. Il est à noter que le modèle ATIM nécessite l'emploi d'au moins trois bandes spectrales (bleu, rouge et proche infrarouge), il n'est pas utilisable avec les données AVHRR.

La méthode ATIM consiste à appliquer un algorithme pour extraire l'épaisseur optique des aérosols à 550nm. Cet algorithme maximise les effets de l'atmosphère en cherchant une valeur d'indice au sol qui satisfait la relation linéaire (équations 38 à 42). L'indice au sol est calculé par un programme qui fait intervenir les valeurs des réflectances apparentes au capteur. Ce programme suppose connus, les intrants aux programmes de simulation utilisés CAM5S ou SMAC, soient les angles d'éclairement et de visée, le modèle atmosphérique, le modèle d'aérosol

(pour le modèle SMAC, des aérosols de type continental sont utilisés par défaut) et la concentration en eau et en ozone. Dans l'algorithme, l'épaisseur optique des aérosols varie jusqu'à ce que l'indice apparent simulé, obtenu selon la relation linéaire, corresponde à l'indice apparent mesuré. La méthode de calcul est basée sur l'algorithme des approches successives : convergence vers la valeur centrale entre les bornes recalculées à chaque pas d'itération. L'épaisseur optique des aérosols finale est celle donnant les égalités définies par les équations 43 à 45 à un seuil de  $10^{-3}$  de précision. Si par contre ces équations ne sont pas satisfaites, c'est que le programme a surestimé (ou sous-estimé) la valeur d'épaisseur optique des aérosols.

$$ARVI_{mesuré} \approx ARVI_{simulé} \quad (43)$$

$$TSARVI_{mesuré} \approx TSARVI_{simulé} \quad (44)$$

$$ATI_{mesuré} \approx ATI_{simulé} \quad (45)$$

Le but est donc de chercher la valeur de l'épaisseur optique des aérosols satisfaisant ces équations. Cette méthode peut être utilisée sans connaître préalablement les propriétés de l'environnement. La sensibilité et la robustesse de cette approche devront être démontrées.

### 5.3.2 Modèle d'inversion DDV

Les corrections directes des effets des aérosols sont basées sur la détermination de l'opacité des aérosols (exprimée par l'épaisseur optique et par la luminance résultante) provenant de pixels spécifiques dans l'image et appliquées à ces pixels pour corriger la même image (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré, 1996). L'une des méthodes utilisées pour extraire l'épaisseur optique des aérosols est celles utilisant les pixels foncées, tels que l'eau, les zones de forêts denses ou les zones ombragées. Le principe de cette méthode est de sélectionner des pixels qui maximisent la contribution atmosphérique du signal mesuré au capteur, ce qui entraîne une meilleure détermination du contenu en aérosols (Soufflet, 1997). L'utilisation des pixels foncés repose sur le fait que l'effet des aérosols est plus fort pour au-dessus des couverts sombres (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré, 1996). Une sélection est faite afin d'obtenir les pixels foncés de l'image. Les endroits ayant un très fort NDVI correspondent à des surfaces de végétation sombre. Les pixels ayant la plus faible réflectance dans le rouge, représentent les pixels où la végétation est le plus dense et pure



Afin de connaître l'épaisseur optique des aérosols au-dessus de la végétation dense, un programme a été conçu. Ce dernier prend en compte les paramètres du programme de simulation CAM5S. Quatre paramètres doivent être connus pour l'exécution du modèle d'inversion DDV, soit : la réflectance apparente de l'environnement (notée  $\rho_{env}^*$ ), la réflectance réelle de la cible (notée  $\rho_{tgt}$ ) d'un certain rayon, la réflectance apparente de la cible avec la contribution de l'environnement (notée  $\rho_{tot}^*$ ) et finalement le rayon de la cible au sol. Le calcul de la réflectance apparente de l'environnement se fait en effectuant une simulation avec CAM5S pour un sol homogène et pour une bande spectrale mince autour de 550nm. Un sol homogène est utilisé afin d'avoir une surface sans grande variation dans son couvert végétal. La valeur de réflectance apparente totale obtenue comprend la réflectance de la cible et de l'environnement apparent. L'algorithme des approches successives est employé en variant l'épaisseur optique des aérosols à chaque pas d'itération. L'épaisseur optique finale est celle donnant l'égalité définie par l'équation 46 au seuil de  $10^{-3}$  de précision :

$$\rho_{550nm\ mesurée}^* \approx \rho_{550nm\ simulée}^* \quad (46)$$

Cependant, la diffusion des aérosols peut rendre difficile l'identification des pixels de forêt. La contribution de la réflectance dans l'infrarouge de courtes longueurs d'onde peut permettre la détermination des pixels de végétation foncée. Dans la partie de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde, la diffusion des aérosols est minimale puisque la longueur d'onde est beaucoup plus grande que la taille des particules de plusieurs aérosols, à l'exception des poussières (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré 1996). L'un des désavantages de la méthode DDV est qu'elle ne peut être employée qu'aux endroits ayant de la végétation dense (donc pas de sols clairs) (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré, 1996). De plus, l'indice de végétation est affecté par les aérosols de l'atmosphère. Le type de cible, ses propriétés de réflectance et l'angle solaire d'éclairement peuvent aussi introduire une erreur dans la détermination de cibles foncées et dans l'estimation de la réflectance des cibles déterminées comme foncées. Ainsi, cette méthode peut être employée aux endroits où le type de couvert est connu a priori (Kaufman et Sendra, 1988; Kaufman et Tanré, 1996).



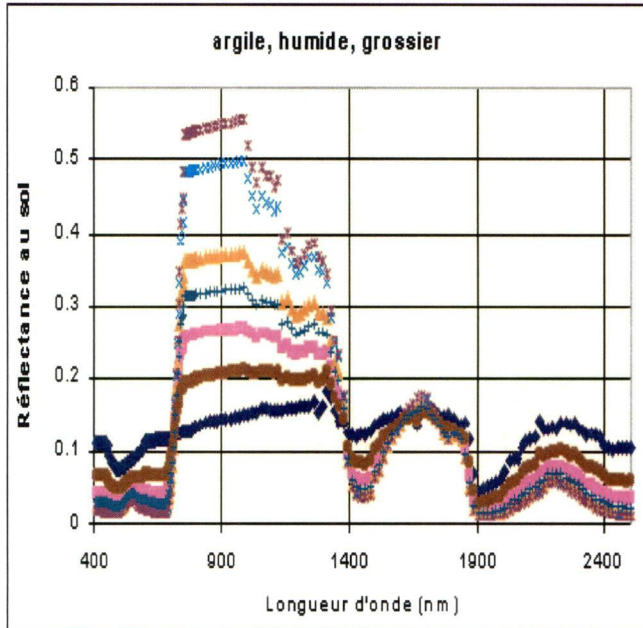
## 6. Analyse des résultats

Dans un premier temps, une simulation à l'aide de SPECAN a été effectuée afin de connaître les valeurs de réflectances au sol pour différents types de couvertures végétales et diverses valeurs de taux de couvertures. Ainsi, sept taux de couvertures végétales (variant entre  $0.01 < \text{LAI} < 6$ ) et quatre types de sols ont été utilisés lors des simulations. Les longueurs d'onde utilisées pour les calculs suivants sont celles des bandes bleue ( $0.45 \mu\text{m}$ ), rouge ( $0.64 \mu\text{m}$ ), proche infrarouge ( $0.84 \mu\text{m}$ ) et moyen infrarouge ( $1.625 \mu\text{m}$ ). La figure 12 démontre, selon le type de sol utilisé, le spectre de réflectance pour ces divers taux de couvertures végétales en fonction de la longueur d'onde.

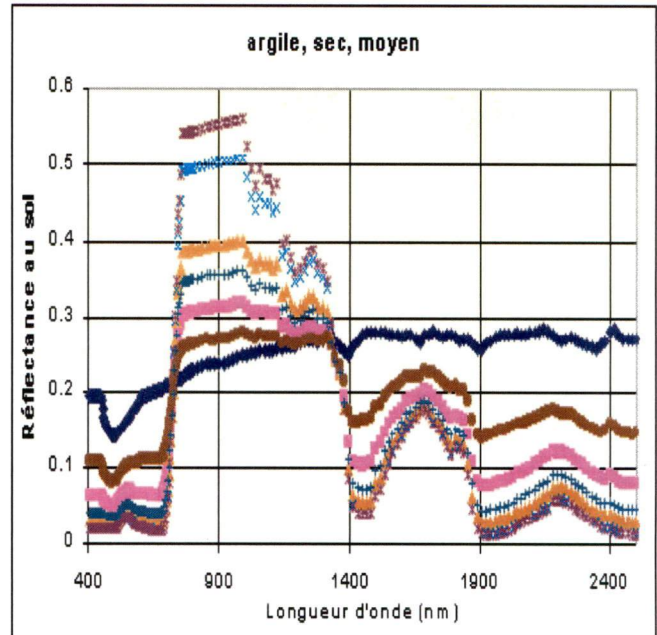
La réflectance varie typiquement entre 0.05 et 0.2 pour un sol nu de type argile, humide et grossier (sol 1, figure 12 a) et peut aller jusqu'à 0.55 pour un couvert dense. Pour le sol de type argile, sec et moyen (sol 6, figure 12 b), la réflectance oscille entre 0.15 et 0.28 pour un sol nu et peut aller jusqu'à 0.55 pour un couvert dense. Le sol 7 (figure 12 c), de type tourbe, humide et grossier, possède une réflectance variant entre 0.05 et 0.25 pour un sol nu. Cette réflectance peut aller jusqu'à 0.55 pour un couvert complet. Finalement, le sol de type tourbe, sec et moyen (sol 12, figure 12 d) possède une réflectance variant entre 0.05 et 0.35 pour un sol nu. Cette réflectance peut aller jusqu'à 0.55 pour un fort LAI. L'effet de l'humidité du sol est apparent sur les figures 12 b) et 12 d). D'après le spectre du sol nu ( $\text{LAI} = 0.01$ ), plus le sol est humide moins grande est la réflectance dans le canal du moyen infrarouge.

La droite des sols nus, dans l'espace proche infrarouge / rouge, est illustrée à la figure 8 afin de faire ressortir l'effet des sols nus sur les spectres de réflectance. Selon cette figure, plus les pixels possèdent un fort LAI, plus grande est la dispersion des points autour de la droite des sols nus. Pour un LAI supérieur à 2, la réflectance dans le proche infrarouge varie entre 0.35 et 0.55 alors que celle du canal rouge varie entre 0.2 et 0.45. Pour un LAI inférieur à 0.1, la réflectance dans le proche infrarouge oscille typiquement entre 0.15 et 0.33 et varie de 0.05 à 0.33 dans le cas du canal rouge. La pente et l'ordonnée à l'origine serviront dans le calcul des indices de végétation TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> au sol.

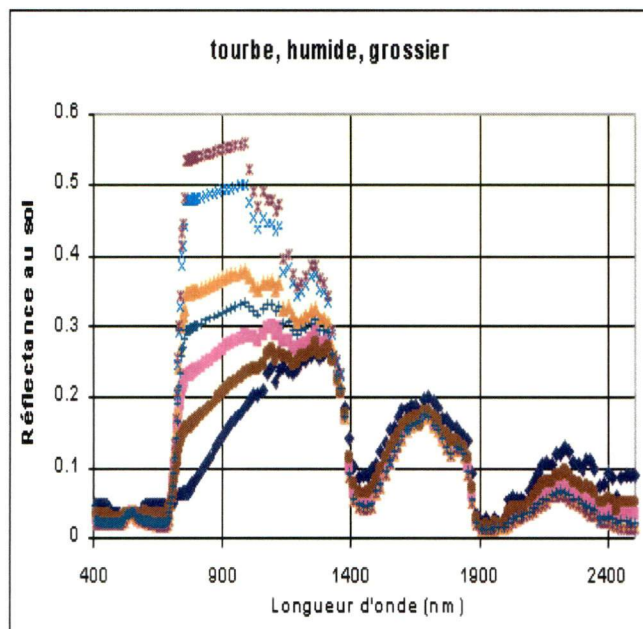
## Réflectances simulées au sol en fonction de la longueur d'onde pour différents LAI et types de sols



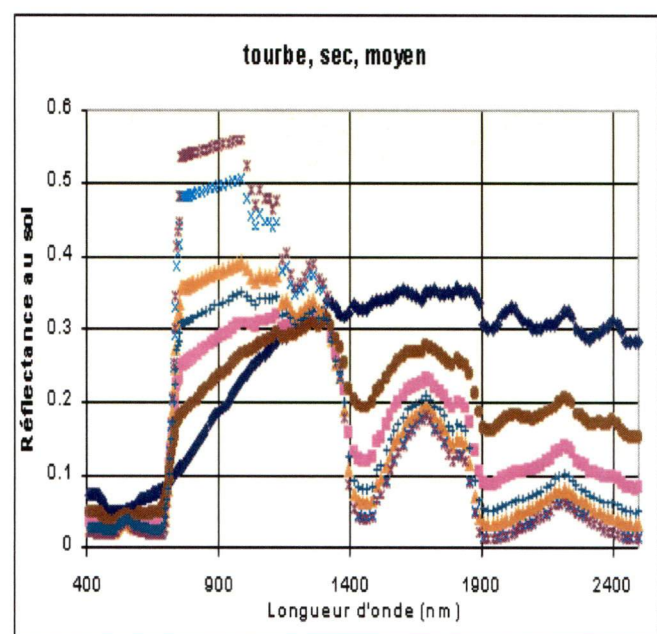
a)



b)

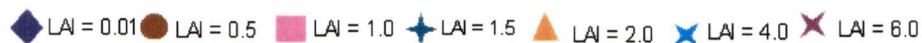


c)



d)

### Légende



**Figure 12 :** Spectres de réflectance en fonction de la longueur d'onde pour différents LAI et types de sol  
 a) argile, humide, grossier b) argile, sec, moyen c) tourbe, humide, grossier d) tourbe, sec, moyen



À partir des valeurs de réflectance simulées au sol, il est alors possible de calculer les indices de végétation NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> au sol. Ce sont ces valeurs d'indices qui seront par la suite comparées aux valeurs simulées au satellite. La figure 13 représente la relation entre les indices de végétation au sol NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> en fonction du LAI. Les indices croissent presque de façon linéaire avec le taux de couverture végétale pour se stabiliser à de hautes valeurs de LAI. La présence de sols nus correspond à un indice de végétation faible, tandis qu'un sol ayant une grande couverture végétale possède un indice de végétation élevé.

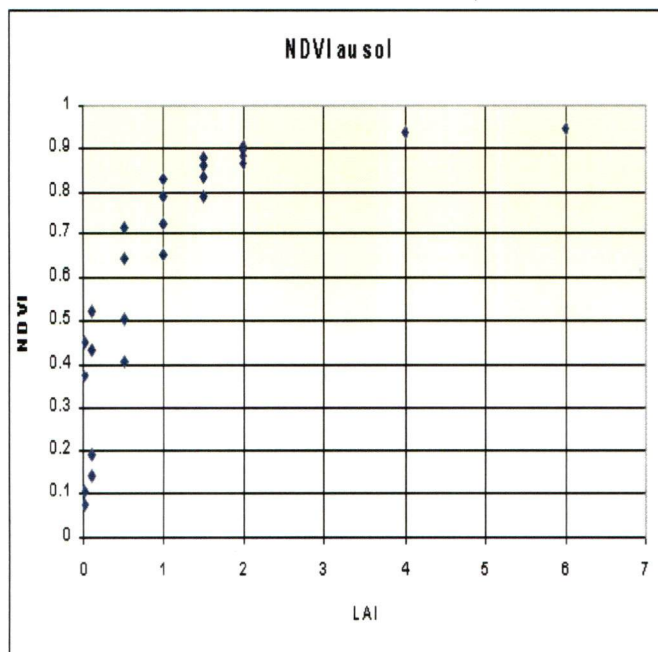
L'indice de végétation NDVI (figure 13 a) est particulièrement influencé par la présence de sols nus. La dispersion des points augmente lorsque le LAI tend vers de faibles valeurs. L'indice NDVI possède des valeurs minimales entre 0.1 et 0.37, selon le type de sol, lorsque le LAI est inférieur à 0.01. À partir de  $\text{LAI} \approx 2$ , la différence de valeur d'indice entre les divers types de sols est réduite. C'est que la contribution de la végétation au signal qui atteint le capteur devient assez importante. L'indice NDVI se stabilise quand le LAI atteint 4 et sa valeur est alors de 0.94.

L'indice TSAVI (figure 13 b) a des valeurs minimales entre - 0.1 et 0.08 lorsque le LAI tend vers zéro. Quand le LAI est supérieur à 4, le TSAVI tend à se stabiliser vers 0.65. La dispersion des points augmente au fur et à mesure que le LAI tend vers de faibles valeurs. Il en ressort que l'indice TSAVI discrimine bien le sol de la végétation tout en étant moins sensible à la présence de sol nu. Ceci, parce que la droite des sols nus dans l'espace proche infrarouge / rouge réduit considérablement les effets du sol.

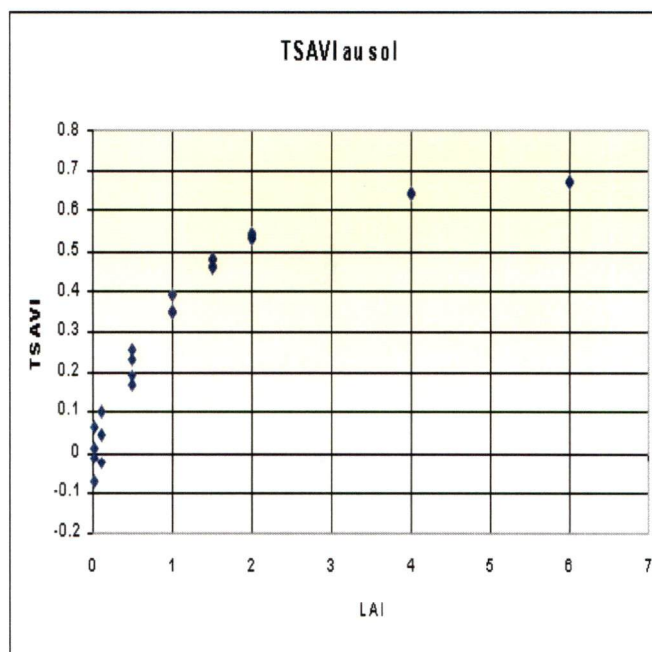
L'indice TSAVI<sub>mod</sub> (figure 13 c) possède des valeurs minimales oscillant entre 0.984 et 0.9885 lorsque le LAI tend vers zéro. Bien que la droite des sols nus contribue en partie à la réduction des effets du sol, il semble que l'indice TSAVI<sub>mod</sub> reste sensible à ces effets. La dispersion des points augmente considérablement lorsque le LAI est inférieur à 1.0. Tout comme le NDVI, à partir de  $\text{LAI} \approx 2$ , l'indice TSAVI<sub>mod</sub> possède moins de différences entre les valeurs d'indice des divers sols. La valeur maximale est obtenue à partir d'un LAI supérieur à 4, où l'indice TSAVI<sub>mod</sub> est de 0.998.



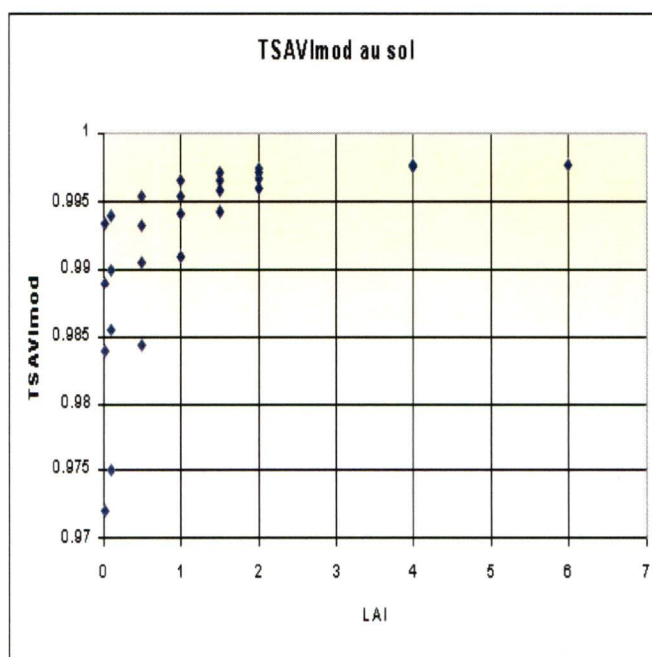
## Indices de végétation simulés au sol en fonction du LAI



a)



b)



c)

**Figure 13 :** Indices de végétation au sol en fonction du LAI  
 a) Indice NDVI b) Indice TSAVI c) Indice TSAVI<sub>mod</sub>

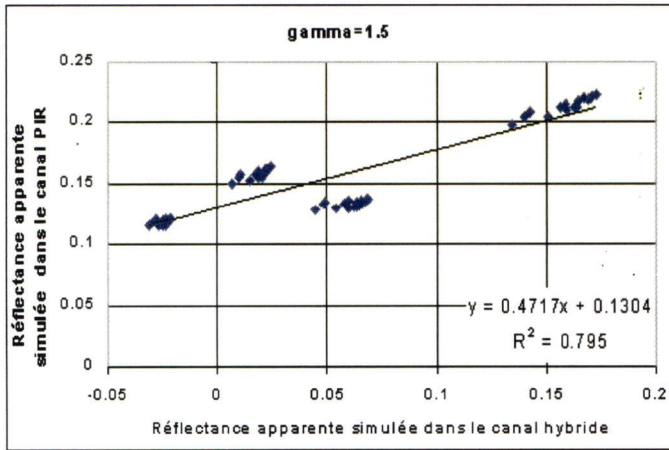
Dans un deuxième temps, les valeurs de la réflectance apparente au capteur ont pu être calculées à partir de CAM5S. Ces réflectances apparentes simulées sont dans les bandes spectrales de SPOT 4 VGT. Une fois ces réflectances apparentes estimées, il est possible de calculer les droites des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride à partir de différents facteurs d'ajustement (noté  $\gamma$ ). Comme ce facteur n'est pas connu à priori, des graphiques de la droite des sols nus, illustrés à la figure 14, sont tracés pour différentes valeurs de facteurs d'ajustement et visibilité. Ces droites permettront d'obtenir la pente et l'ordonnée à l'origine afin de calculer les indices de végétation apparents au capteur : ARVI, TSARVI et ATI. Le tableau 4 résume les droites de régression dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride pour différents facteurs d'ajustement.

**Tableau 4 :** Droites des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride pour différents  $\gamma$

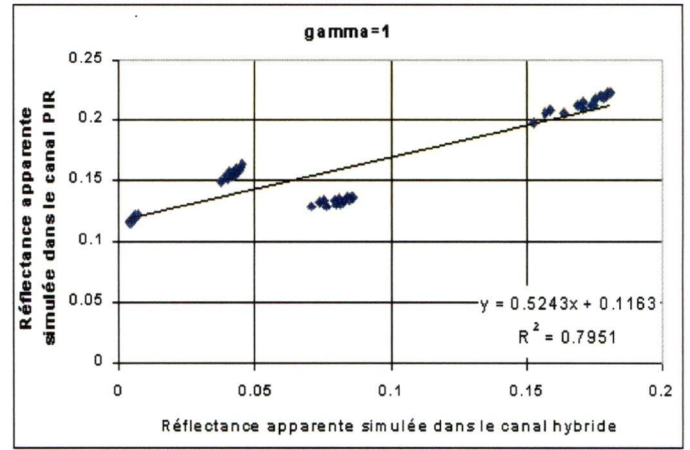
Facteur d'ajustement ( $\gamma$ )	Droites des sols nus $\rho_{PIR}^* = a_{PIR/RB} \times \rho_{RB}^* + b_{PIR/RB}$	Coefficient de régression $R^2$
1.5	$0.4717\rho_{RB}^* + 0.1304$	0.795
1.0	$0.5243\rho_{RB}^* + 0.1163$	0.7951
0.75	$0.5543\rho_{RB}^* + 0.1081$	0.7939
0.5	$0.5871\rho_{RB}^* + 0.0988$	0.7914
0.4	$0.6011\rho_{RB}^* + 0.0948$	0.79
0.3	$0.6153\rho_{RB}^* + 0.0907$	0.7882

D'après la figure 14 a), lorsque le facteur d'ajustement est de 1.5, certaines valeurs de réflectance du canal hybride sont inférieures à zéro et peuvent aller jusqu'à 0.17. Au fur et à mesure que le facteur d'ajustement diminue, on observe un décalage des valeurs de réflectance vers la droite, soit vers les plus fortes valeurs du canal hybride. Les valeurs de réflectance du canal hybride varient alors entre 0.03 et 0.19 selon le type de sol. Lorsque  $\gamma = 1.0$  (figure 14 b), la dispersion des points autour de la droite des sols nus diminue, ce qui signifie que la contribution des sols nus sur les indices de végétation est réduite. C'est cette valeur qui a été employée pour le calcul des indices apparents en fonction de la densité végétale illustré à la figure 15.

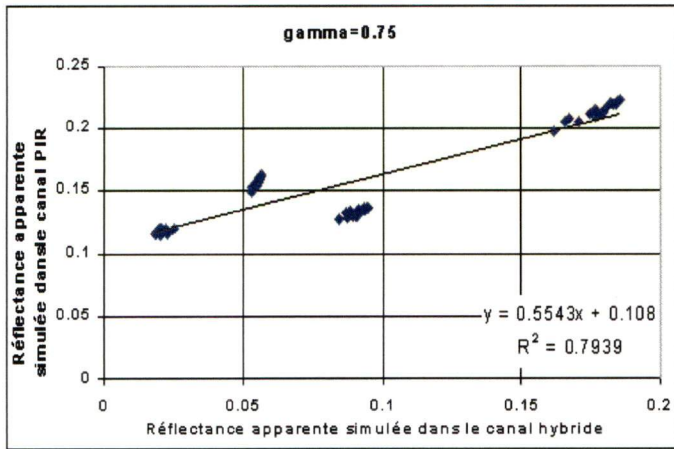
**Droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride pour différents types de sols, visibilités et concentrations en eau (facteur d'ajustement gamma variable)**



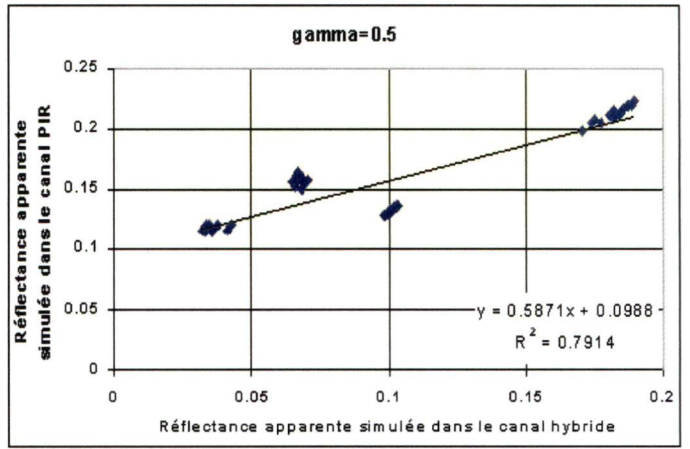
a)



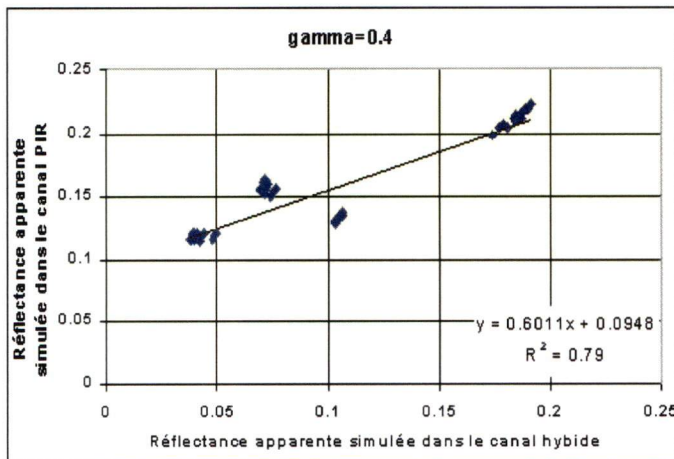
b)



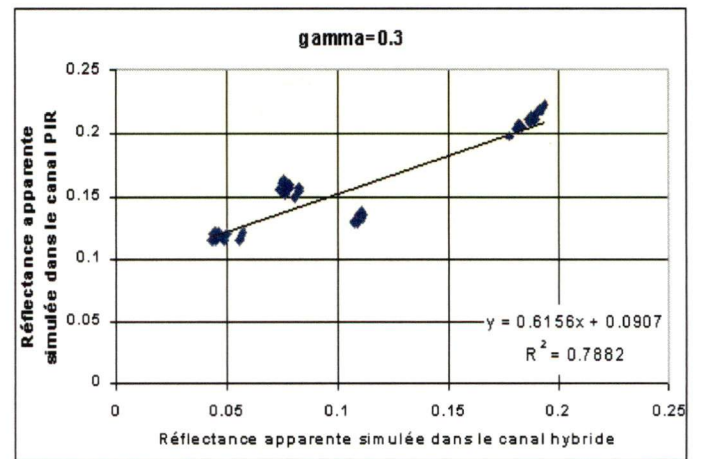
c)



d)



e)



f)

**Figure 14 : Droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride**

a)  $\gamma = 1.5$  b)  $\gamma = 1.0$  c)  $\gamma = 0.75$  d)  $\gamma = 0.5$  e)  $\gamma = 0.4$  f)  $\gamma = 0.3$



La figure 15 représente les indices de végétation ATI, NDWI, NDVI, ARVI et TSARVI apparents en fonction du taux de couverture au sol pour différentes valeurs de visibilités (*épaisseur optique des aérosols* notée dans la légende: *eo<sub>a</sub>* (550nm) ).

La conversion entre la visibilité et l'épaisseur optique des aérosols pour le modèle d'aérosols standard pour les États-Unis est résumée au tableau 5:

**Tableau 5** : Conversion visibilité et épaisseur optique des aérosols à 550nm

Visibilité (km)	Épaisseur optique des aérosols
5	0.5874
10	0.3254
23	0.1768
50	0.1163
100	0.0868

Lorsque la visibilité est de 100 km, les valeurs de l'indice ATI (figure 15 a) croissent presque de façon linéaire pour se stabiliser vers 1.003 alors que le LAI est supérieur à 4. Tandis que pour une visibilité de 5 km, l'indice ATI possède des valeurs oscillant entre 0.989 et 0.994 pour un couvert épars et se stabilise à 0.996 pour un couvert dense. L'indice ATI est particulièrement influencé par une forte épaisseur optique des aérosols. En effet, pour  $eo_a(550nm) = 0.5874$ , l'indice ATI possède des valeurs nettement inférieures à celles obtenues lorsque l'épaisseur optique des aérosols est plus faible. Cet indice offre tout de même une bonne discrimination des sols nus de la végétation.

Le NDWI (figure 15 b) varie entre - 0.3 et 0.15 lorsque le LAI est inférieur à 1.0. Au fur et à mesure que le taux de couverture végétale augmente, l'indice NDWI croît pour se stabiliser vers 0.5 alors que la visibilité est de 100 km et à 0.4 alors que la visibilité est de 5 km. Lorsque la végétation est dense, la dispersion des points entre les différentes visibilités est moindre qu'avec

les autres indices, ce qui signifie que l'indice de végétation NDWI permet une bonne réduction de l'épaisseur optique des aérosols, par l'apport de la bande du moyen infrarouge. Cet indice est donc résistant aux effets atmosphériques.

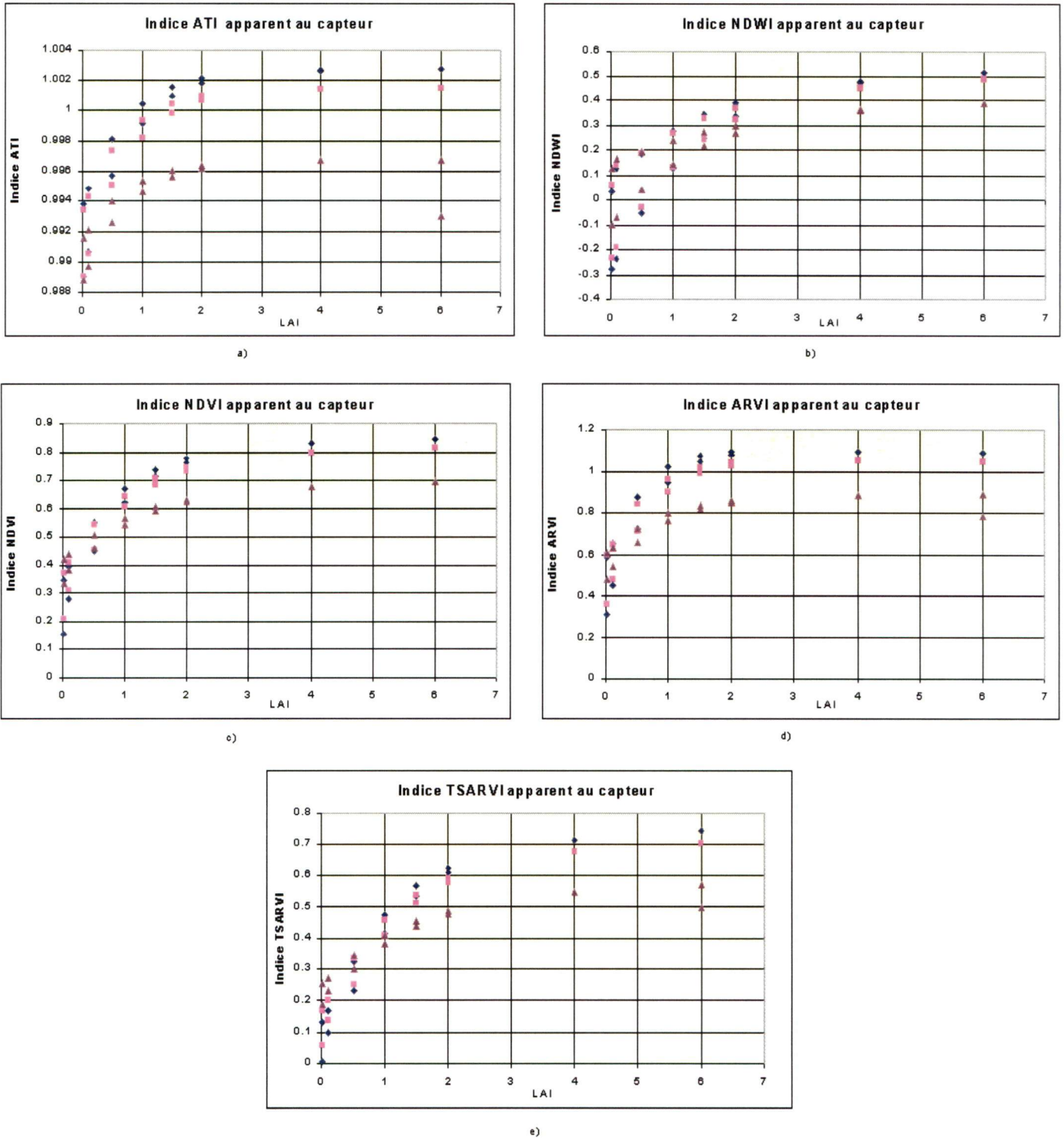
Le NDVI (figure 15 c) se stabilise à environ 0.83 quand le LAI est égal à 6 et lorsque la visibilité est de 100 km. Pour une épaisseur optique des aérosols élevée, le NDVI possède des valeurs maximales vers 0.7. La dispersion des points augmente au fur et à mesure que le LAI tend vers zéro, ce qui signifie que cet indice reste sensible aux effets du sol sous-jacent. Les valeurs minimales de l'indice NDVI varient entre 0.15 et 0.45 pour un LAI égal à 0.01.

L'indice ARVI (figure 15 d) a une valeur maximale de 1.1, lorsque le LAI est de 6 et que  $\tau_{550nm} = 0.0868$ . Tandis que pour  $\tau_{550nm} = 0.5874$ , la valeur maximale de l'indice ARVI est de 0.9. Une plus grande dispersion des points est observée lorsque le couvert est éparé. L'indice ARVI varie alors entre 0.3 et 0.6 selon la visibilité et le type de sol ce qui indique que cet indice est sensible à la présence de sol sous-jacent.

L'indice TSARVI (figure 15 e) est de 0.01 pour un couvert éparé et lorsque la visibilité est de 100 km. Sa valeur est de 0.27 pour un couvert éparé et une visibilité de 5 km. Une certaine dispersion des points indique que cet indice reste sensible à la présence de sol. Pour un LAI élevé, le TSARVI se stabilise à 0.57 pour une visibilité de 5 km et à 0.73 pour une visibilité de 100 km.

En conclusion, ce sont les indices ATI et TSARVI qui semblent réduire le plus les effets du sol. Par contre lorsque la densité de végétation est élevée, les indices se stabilisent mais restent tout de même influencés par une forte épaisseur optique des aérosols. Ceci est particulièrement remarquable sur l'indice ATI. Dans le cas d'une forte épaisseur optique des aérosols, c'est l'indice NDWI qui possède la plus faible dispersion des valeurs d'indice.

## Indices de végétation simulés au capteur en fonction du LAI pour différentes visibilités



## Légende

◆ eoa (550 nm) = 0.0868    ■ eoa (550 nm) = 0.1768    ▲ eoa (550 nm) = 0.5874

**Figure 15 :** Indices de végétation apparents au capteur en fonction du taux de couverture végétale  
a) indice ATI b) indice NDWI c) indice NDVI d) indice ARVI e) indice TSARVI



## 6.1 Relation entre les indices apparents et les indices au sol

Les parties suivantes illustrent les relations entre les indices apparents et les indices au sol. L'indice au sol a été calculé à partir des réflectances au sol simulées pour différents types de sol (sol 1, sol 6, sol 7, sol 12) et taux de couverture végétale ( $0.01 < LAI < 6.0$ ). L'indice apparent a été calculé à partir des réflectances simulées au capteur pour différentes concentrations en eau ( $1.42 \text{ g cm}^{-1} < [\text{eau}] < 4.0 \text{ g cm}^{-1}$ ) et visibilité (5 km, 10 km, 23 km, 50 km, 100 km). Les réflectances apparentes ont été simulées dans les bandes spectrales de SPOT 4 VGT.

### 6.1.1 Relation entre le ARVI apparent et le NDVI au sol

La figure 16 illustre la relation entre l'indice ARVI simulé au capteur et le NDVI simulé au sol pour un facteur d'ajustement variant entre  $0.3 < \gamma < 1.5$ . Le tableau 6 résume les équations en fonction des facteurs d'ajustement et l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs des indices ARVI simulé au capteur et NDVI simulé au sol.

Lorsque le facteur d'ajustement est de 1.5 (figure 16 a), les valeurs minimales de l'indice ARVI sont entre 0.1266 et 1.631 pour un LAI de 0.01. Pour un couvert complet, les valeurs de l'indice ARVI varient entre 1.27 et 1.51. Les valeurs maximales apparaissent pour le sol 7, lorsque le LAI est de 0.05, où la valeur de l'indice peut atteindre 1.7922. Le coefficient de la régression linéaire entre les indices ARVI et NDVI est  $R^2 = 0.689$ . Alors que le facteur d'ajustement diminue, les valeurs d'indice ARVI diminuent aussi. Pour un facteur d'ajustement de 1.0 et un LAI de 0.01 (figure 16 b), les valeurs de l'indice ARVI oscillent entre 0.096 et 0.9251. Lorsque le taux de couverture végétale est de 6, l'indice ARVI varie entre 1.102 et 1.135. Le coefficient de la régression linéaire entre les indices est alors  $R^2 = 0.9206$ . La valeur des points autour de la droite de régression diminue au fur et à mesure que le facteur approche la valeur de  $\gamma = 0.4$  (figure 16 e). Ceci démontre une résistance aux effets atmosphériques. Les valeurs de l'indice ARVI sont entre 0.06 et 0.51 pour un couvert épars. Et entre 0.8966 et 0.9664 pour un couvert dense. Le coefficient de la régression linéaire entre les indices ARVI et NDVI est  $R^2 = 0.9881$ .

ARVI simulé au capteur en fonction du NDVI simulé au sol pour différents types de sols, concentrations en eau, visibilité et LAI (facteur d'ajustement gamma variable)

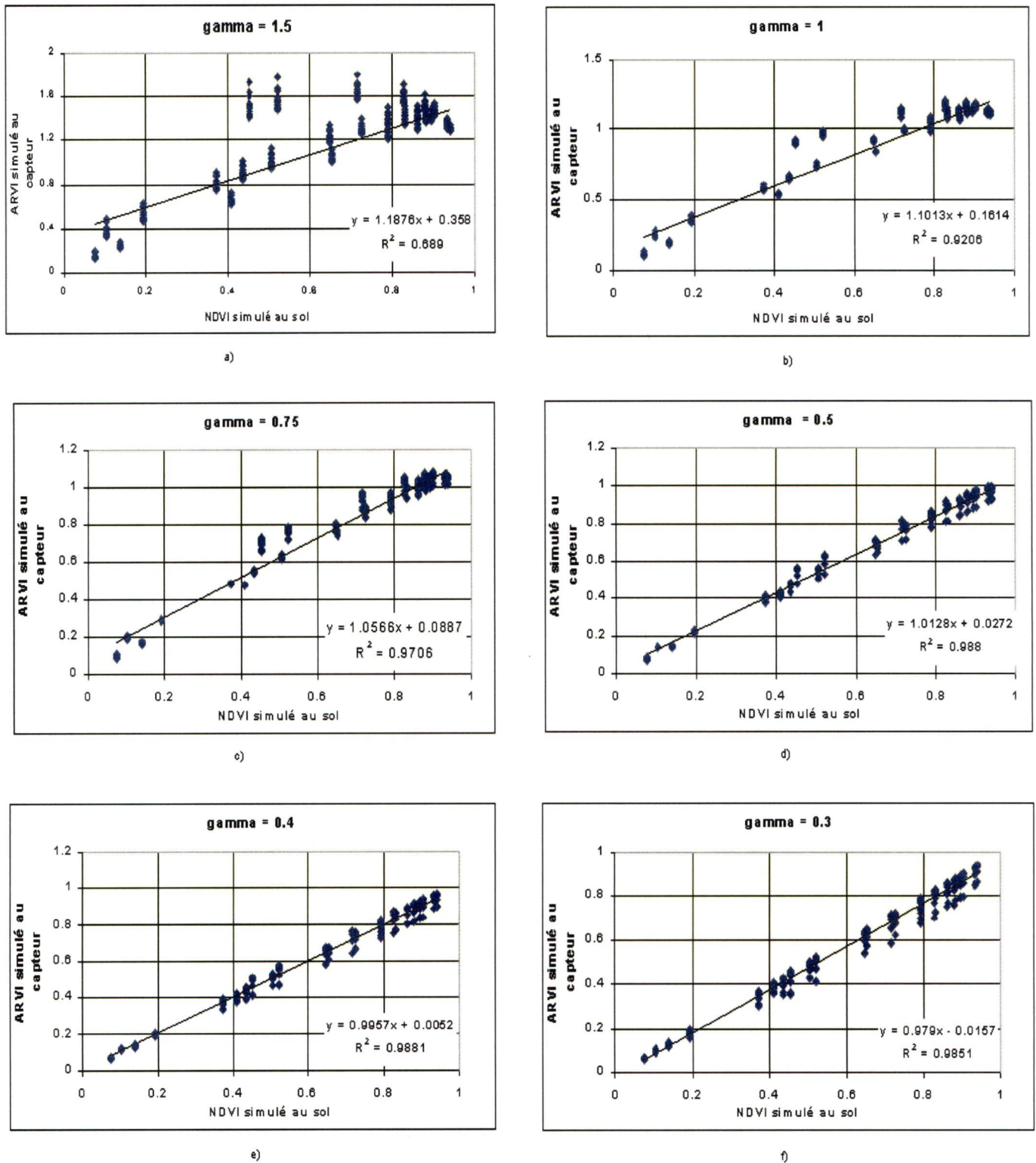


Figure 16 : Relation entre les indices ARVI simulé au capteur et NDVI simulé au sol pour différents  $\gamma$

a)  $\gamma = 1.5$ , b)  $\gamma = 1.0$  c)  $\gamma = 0.75$  d)  $\gamma = 0.5$  e)  $\gamma = 0.4$  f)  $\gamma = 0.3$

Un facteur d'ajustement élevé accroît la contribution du sol dans le spectre de réflectance totale apparente, ce qui fait en sorte que l'indice ARVI soit sensible aux effets du sol. Un faible facteur d'ajustement diminue la contribution du canal bleu. Le canal hybride est alors influencé par l'atmosphère, à cause de la présence du canal rouge, ce qui entraîne une dispersion des points autour de la droite de régression. Ce phénomène est observable au-dessus de couvertures végétales denses où les effets de l'atmosphère sont les plus perceptibles. La relation ARVI / NDVI offre une bonne linéarité lorsque  $\gamma = 0.4$  rendant l'indice ARVI résistant aux effets atmosphériques mais tout de même sensible aux effets du sol.

**Tableau 6 :** Relations entre les indices ARVI simulé au capteur et NDVI simulé au sol pour différents  $\gamma$

$\gamma$	Équation linéaire $ARVI = c_1 \times NDVI + c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indices
1.5	1.1876 NDVI 0.358	0.689	0.0245
1.0	1.1009 NDVI + 0.1616	0.9206	0.0114
0.75	1.0564 NDVI + 0.0887	0.9706	0.0063
0.5	1.0128NDVI + 0.0272	0.988	0.0022
0.4	0.9957 NDVI + 0.1616	0.9881	0.0014
0.3	0.979 NDVI + 0.358	0.9851	0.0021

### 6.1.2 Relation entre le TSARVI apparent et le NDVI au sol

La figure 17 illustre la droite reliant l'indice de végétation TSARVI simulé au capteur (pour  $0.3 < \gamma < 1.5$ ) à l'indice NDVI simulé au sol. Différents types de sols, concentrations en eau et visibilités, tel qu'indiqué précédemment, sont utilisés. Le tableau 7 résume les droites de régression des différents graphiques et l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs des indices TSARVI simulé au capteur et NDVI simulé au sol.

Pour un facteur d'ajustement de 1.5 (figure 17 a) et un LAI de 0.01, l'indice TSARVI oscille entre  $-0.08$  et  $0.083$ . Pour un LAI de 6, l'indice TSARVI possède des valeurs entre  $0.886$  et  $0.902$ . Le coefficient de la régression linéaire entre les deux indices est de  $R^2 = 0.9121$ .



Pour un facteur d'ajustement de 1.0 (figure 17 b) et un taux de couverture végétale de 0.01, l'indice TSARVI possède des valeurs entre  $-0.0781$  et  $0.0697$ . Avec un LAI = 6, l'indice TSARVI a des valeurs entre  $0.7116$  et  $0.7678$ . Le coefficient de la régression linéaire entre les indices TSARVI et NDVI est de  $R^2 = 0.8879$ .

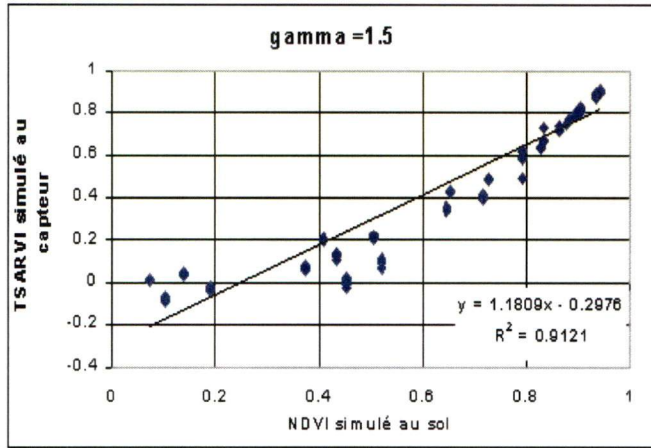
D'après la figure 17, plus le facteur d'ajustement devient faible, plus la dispersion des points autour de la droite de régression augmente. Ainsi, pour un facteur d'ajustement de 0.3 (figure 17 f), les valeurs de l'indice TSARVI varient entre  $-0.0746$  et  $0.0655$ . Pour un LAI de 6, les valeurs de TSARVI sont entre  $0.5666$  et  $0.6561$ . Le coefficient de la régression linéaire entre les deux indices est  $R^2 = 0.8568$ .

Lorsque la couverture végétale est faible, l'influence du sol sous-jacent est importante. La dispersion des points autour de la droite de régression augmente au fur et à mesure que le taux de couverture au sol diminue. Ceci est dû à la grande sensibilité de l'indice NDVI aux propriétés optiques du sol, tandis que l'indice TSARVI reste tout de même plus résistant à ces effets en maximisant le signal issu de la végétation. En fait, la relation TSARVI / NDVI offre une moins grande corrélation que la relation ARVI / NDVI et ne sera pas considérée dans les traitements suivants.

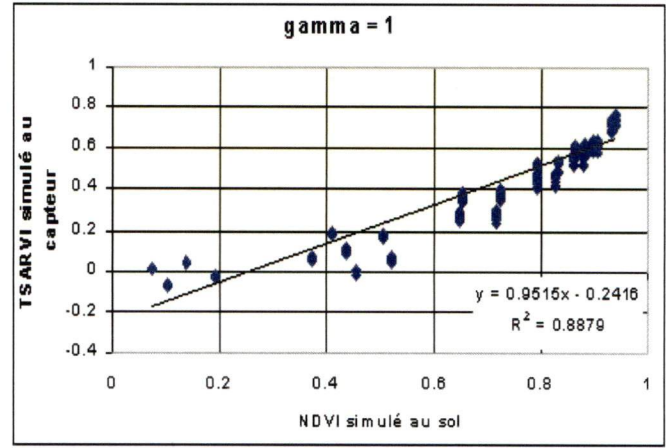
**Tableau 7 :** Relations entre les indices TSARVI simulé au capteur et NDVI simulé au sol pour différents  $\gamma$

$\gamma$	Équation linéaire TSARVI = $c_1 \times$ NDVI + $c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indice
1.5	1.1809 NDVI – 0.2876	0.9121	0.0094
1.0	0.9521 NDVI – 0.2418	0.8879	0.0133
0.75	0.8749 NDVI – 0.2223	0.8763	0.0148
0.5	0.8126 NDVI – 0.2065	0.8653	0.0161
0.4	0.7906 NDVI – 0.2009	0.8611	0.0161
0.3	0.7703 NDVI – 0.1958	0.8568	0.0169

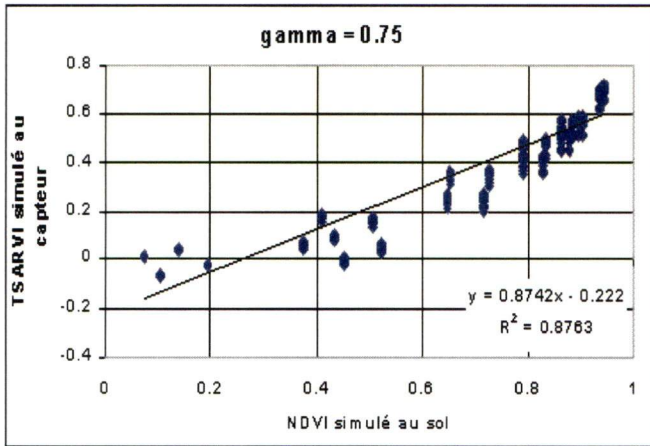
TSARVI simulé au capteur en fonction du NDVI simulé au sol pour différents types de sols, concentrations en eau, visibilités et LAI (facteur d'ajustement gamma variable)



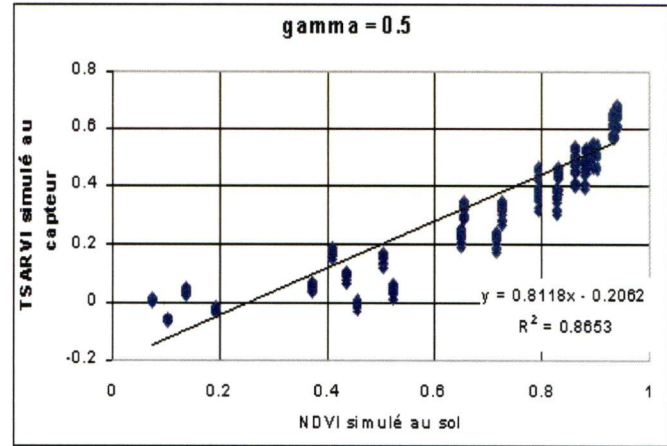
a)



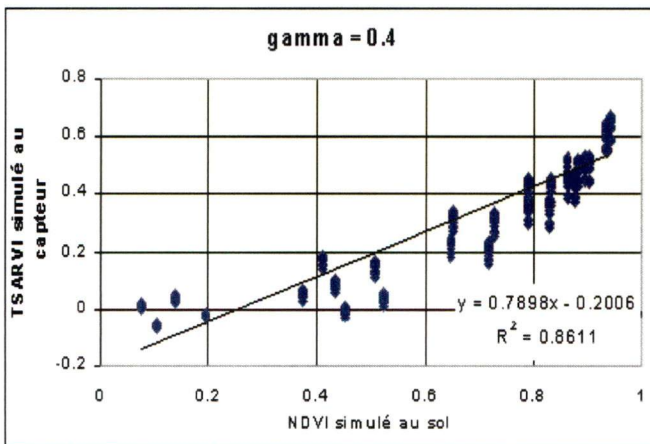
b)



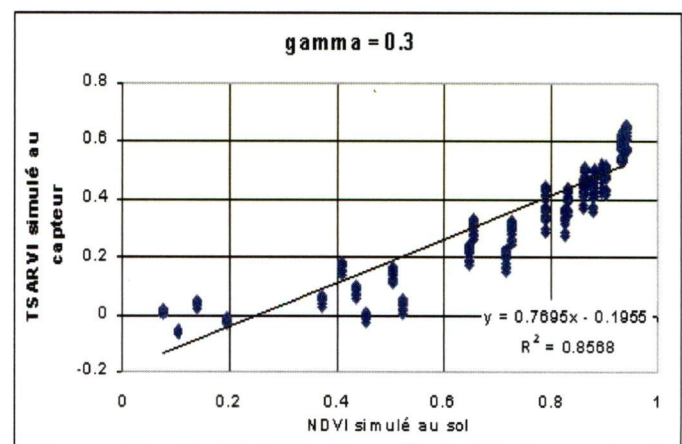
c)



d)



e)



f)

Figure 17 : Relation entre les indices TSARVI simulé au capteur et NDVI simulé au sol pour différents  $\gamma$   
a)  $\gamma = 1.5$  b)  $\gamma = 1.0$  c)  $\gamma = 0.75$  d)  $\gamma = 0.5$  e)  $\gamma = 0.4$  f)  $\gamma = 0.3$



### 6.1.3 Relation entre le ARVI apparent et le TSAVI au sol

La figure 18 de l'indice ARVI simulé au capteur ( $0.3 < \gamma < 1.5$ ) en fonction de l'indice TSAVI simulé au sol montre bien la contribution du sol et de l'atmosphère sur la relation entre les indices. Différents types de sols, concentrations en eau et visibilités, tel qu'indiqué précédemment, sont utilisés pour le calcul des indices apparents. Le tableau 8 résume les résultats des graphiques et l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs des indices ARVI simulé au capteur et TSAVI simulé au sol.

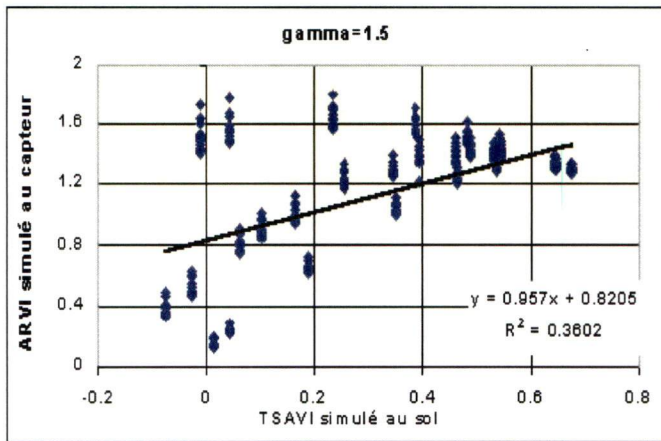
**Tableau 8** : Relations entre les indices ARVI simulé au capteur et TSAVI simulé au sol pour différents  $\gamma$

$\gamma$	Équation linéaire $ARVI = c_1 \times TSAVI + c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indices
1.5	$0.957 \text{ TSAVI} + 0.8205$	0.3602	0.0395
1.0	$1.0338 \text{ TSAVI} + 0.5362$	0.6538	0.0265
0.75	$1.0427 \text{ TSAVI} + 0.4295$	0.7614	0.0214
0.5	$1.0407 \text{ TSAVI} + 0.3388$	0.8398	0.0169
0.4	$1.0378 \text{ TSAVI} + 0.3061$	0.8638	0.0154
0.3	$1.0339 \text{ TSAVI} + 0.2752$	0.8842	0.0138

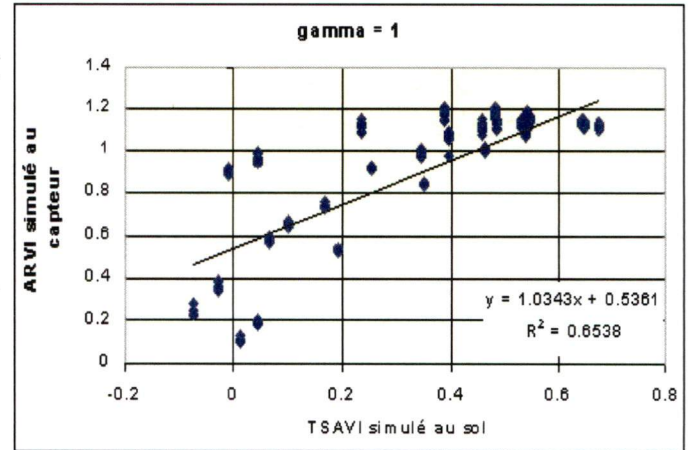
La dispersion des points sur les graphiques est grande parce que l'indice ARVI est sensible à la présence de sol nu. Ici, plus le facteur d'ajustement est faible plus la dispersion des points autour de la droite de régression diminue. À savoir, plus le facteur d'ajustement décroît, plus la contribution du canal bleu est réduite ce qui accentue la sensibilité du canal hybride aux effets de l'atmosphère. L'indice ARVI ressemblera alors davantage à l'indice NDVI qui lui est sensible aux propriétés optiques du sol ainsi qu'aux effets de l'atmosphère. En outre, lorsque la couverture végétale est de faible densité, l'indice de végétation ARVI devient très sensible à la contribution du sol sous-jacent. Ceci le rend nettement moins efficace par rapport à l'indice TSAVI qui est moins influencé par le sol sous-jacent à cause de la contribution de la droite des sols nus. En somme, parce que la relation ARVI / TSAVI n'offre pas une bonne corrélation, elle ne sera pas considérée lors des traitements suivants.



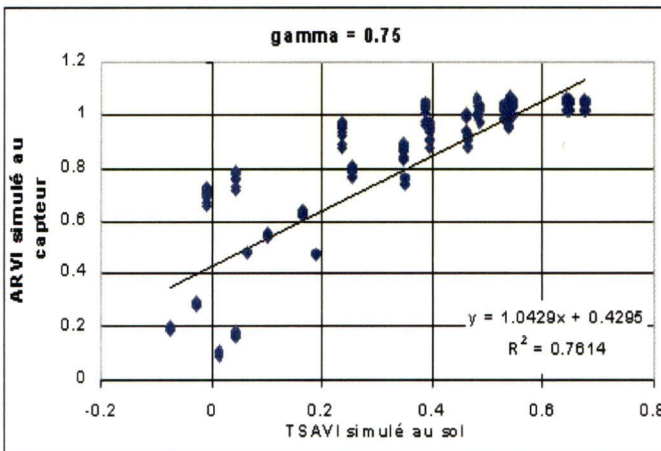
ARVI simulé au capteur en fonction du TSAVI simulé au sol pour différents types de sols, concentrations en eau, visibilités et LAI (facteur d'ajustement gamma variable).



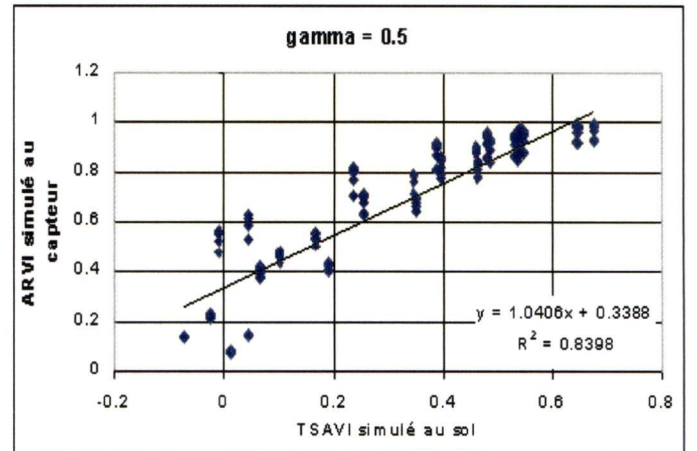
a)



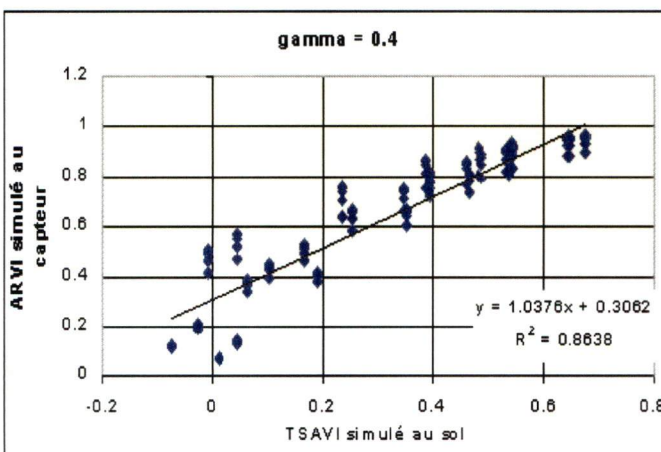
b)



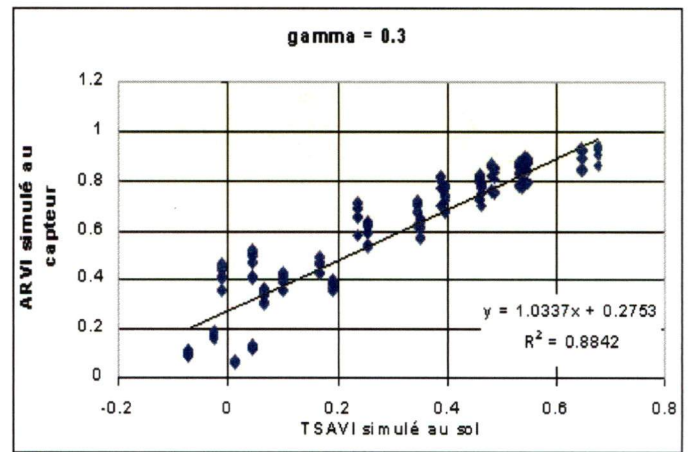
c)



d)



e)



f)

Figure 18 : Relation entre les indices ARVI simulé au capteur et TSAVI simulé au sol pour différents  $\gamma$   
a)  $\gamma = 1.5$  b)  $\gamma = 1.0$  c)  $\gamma = 0.75$  d)  $\gamma = 0.5$  e)  $\gamma = 0.4$  f)  $\gamma = 0.3$

#### 6.1.4 Relation entre le TSARVI apparent et le TSAVI au sol

La figure 19, de l'indice TSARVI simulé au capteur ( $0.3 < \gamma < 1.5$ ) en fonction de l'indice TSAVI simulé au sol, illustre bien le comportement semblable de ces deux indices. Différents types de sols, concentrations en eau et visibilités, tel qu'indiqué précédemment, sont utilisés dans le calcul des indices apparents. Le tableau 9 résume les équations des graphiques et l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs des indices TSARVI simulé au capteur et TSAVI simulé au sol. Au fur et à mesure que la valeur du facteur d'ajustement s'éloigne de 1.0, la dispersion des points autour de la droite de régression augmente. Ceci est dû au fait que l'indice TSARVI devient alors sensible aux effets de l'atmosphère et du sol sous-jacent à la végétation.

**Tableau 9** : Relations entre les indices TSARVI simulé au capteur et TSAVI simulé au sol pour différents  $\gamma$

$\gamma$	Équation linéaire $\text{TSARVI} = c_1 \times \text{TSAVI} + c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indices
1.5	$1.3682 \text{ TSAVI} - 0.0086$	0.9857	0.008
1.0	$1.1232 \text{ TSAVI} - 0.0024$	0.9945	0.0025
0.75	$1.0381 \text{ TSAVI} - 0.045$	0.9929	0.0012
0.5	$0.9688 \text{ TSAVI} - 0.0006$	0.9898	0.0014
0.4	$0.9442 \text{ TSAVI} - 0.0063$	0.9883	0.0018
0.3	$0.9215 \text{ TSAVI} - 0.0068$	0.9866	0.0022

Une augmentation de la dispersion des points autour de la droite de régression, au-dessus de couverts végétaux denses, fait ressortir l'effet d'une forte concentration en aérosols. Les perturbations atmosphériques intensifient la réflectance au-dessus de la végétation dans le rouge et réduisent celle dans le proche infrarouge. Plus le facteur d'ajustement est faible, plus la dépendance aux effets atmosphériques devient notable. Par contre, ces deux indices de végétation résistent bien aux effets d'une faible densité végétale. Les paramètres de la droite des sols nus minimisent les effets du sol nus sur les indices de végétation. La dispersion des points autour de la droite de régression est réduite lorsque l'on emploie la relation entre les indices TSARVI apparent au capteur et TSAVI au sol, ce qui démontre la résistance générale de cette relation face aux effets du sol et de l'atmosphère.



TSARVI simulé au capteur en fonction du TSAVI simulé au sol pour différents types de sols, concentrations en eau, visibilités et LAI (facteur d'ajustement gamma variable)

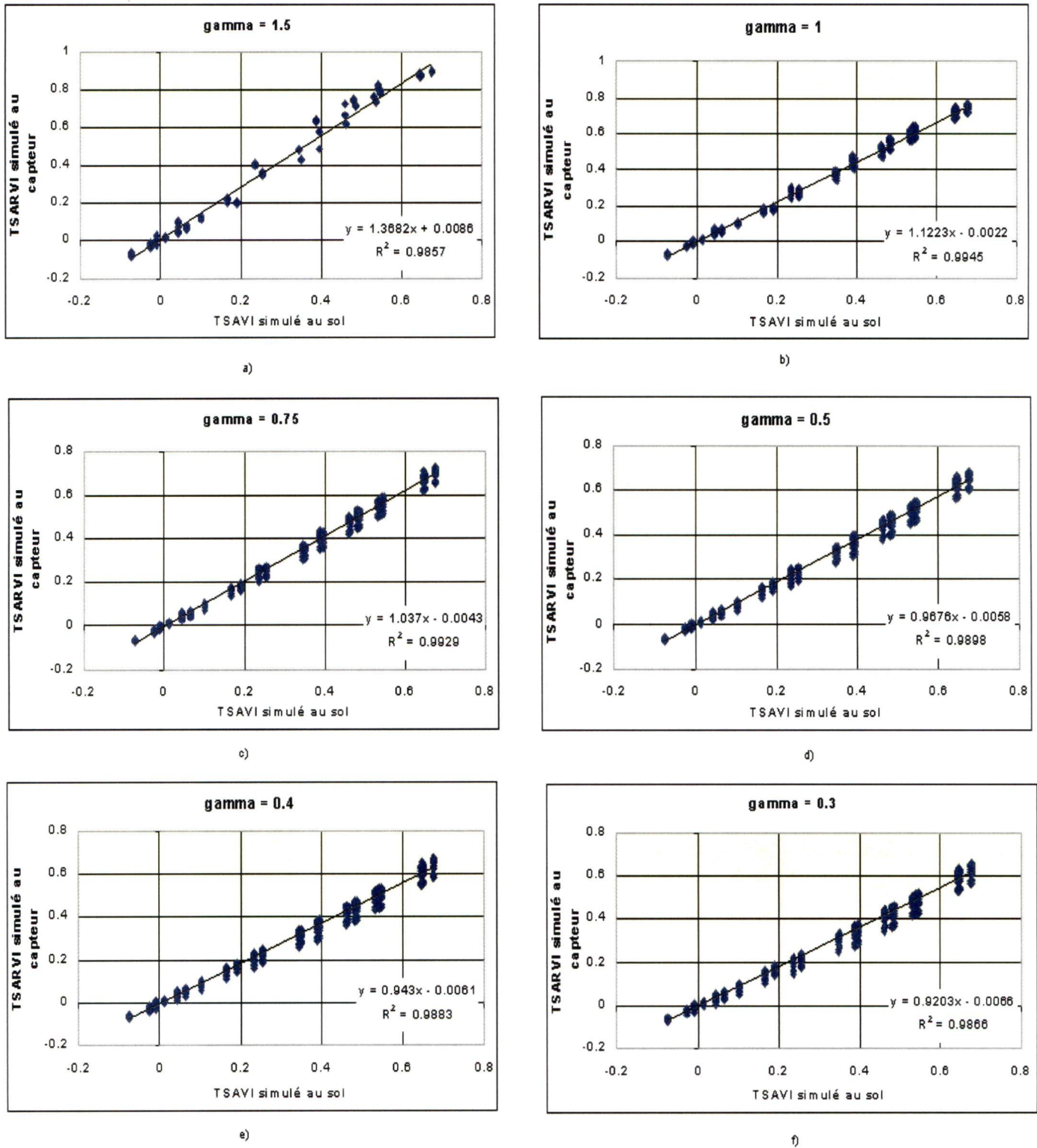


Figure 19 : Relation entre les indices TSARVI simulé au capteur et TSAVI simulé au sol pour différents  $\gamma$   
a)  $\gamma = 1.5$  b)  $\gamma = 1.0$  c)  $\gamma = 0.75$  d)  $\gamma = 0.5$  e)  $\gamma = 0.4$  f)  $\gamma = 0.3$



### 6.1.5 Relation entre le ATI apparent et le TSAVI<sub>mod</sub> au sol

Les graphiques de l'indice ATI simulé au capteur ( $0.3 < \gamma < 1.5$ ) en fonction de l'indice TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol, à la figure 20, établissent la relation linéaire qui existe entre ces deux nouveaux indices. Différents types de sols, concentrations en eau et visibilités, tel qu'indiqué précédemment, sont utilisés dans le calcul des indices apparents. Le tableau 10 résume les équations des graphiques et l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs des indices ATI simulé au capteur et TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol.

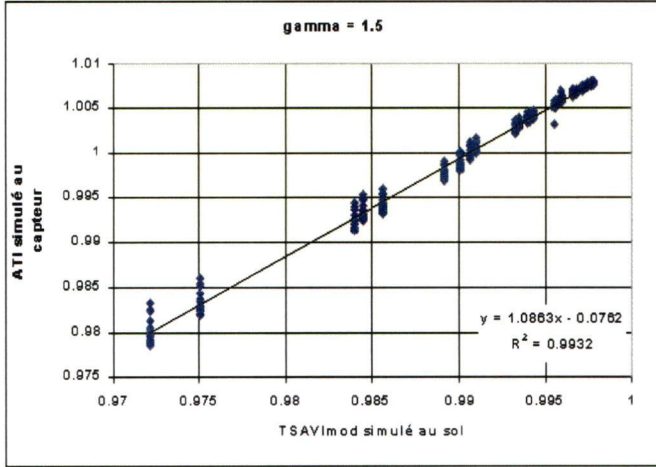
Pour un facteur d'ajustement de 1.5 (figure 20 a) et un LAI de 0.01, les valeurs de l'indice ATI varient entre 0.9785 et 1.003. Pour un LAI de 6, les valeurs de l'indice ATI sont de 1.007 à 1.008. Le coefficient de la régression linéaire entre les deux indices est  $R^2 = 0.9932$ .

La dispersion des points autour de la droite de régression diminue au fur et à mesure que le facteur d'ajustement tend vers 1.0. Pour un facteur d'ajustement de 1.0 (figure 20 b) et un LAI de 0.01, l'indice ATI possède des valeurs de 0.9776 à 0.9994. Pour un couvert dense, les valeurs de l'indice ATI oscillent entre 1.002 et 1.003. Le coefficient de la régression linéaire entre les indices ATI et TSAVI<sub>mod</sub> est de  $R^2 = 0.9958$ .

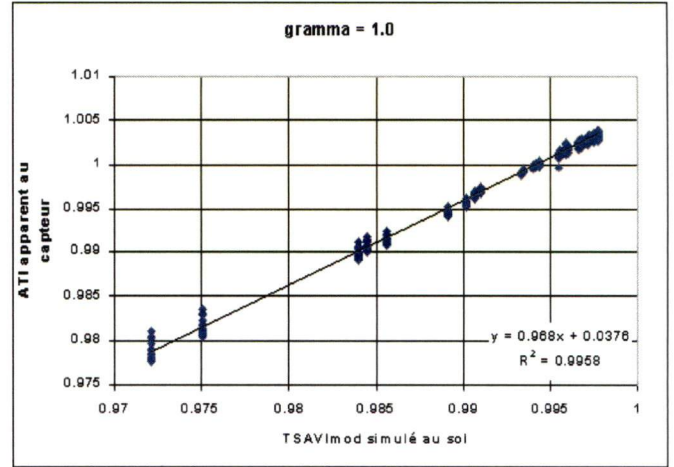
Pour un facteur d'ajustement de 0.5 (figure 20 d) et un LAI de 0.01, l'indice ATI a des valeurs entre 0.9765 et 0.9959. Lorsque le LAI est de 6, l'indice ATI varie entre 0.9978 et 0.9996. Le coefficient de la régression linéaire entre les deux indices est alors de  $R^2 = 0.9902$ .

Pour tous les facteurs d'ajustement inférieurs à 1.0, l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs des indices ATI simulé au capteur et TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol est de moins de 1% et plus le facteur d'ajustement est faible, plus l'erreur quadratique entre les indices diminue. C'est cette relation qui possède la plus petite dispersion des points autour de la droite de régression ainsi que l'erreur quadratique entre les valeurs des indices la plus faible. Cette relation entre les nouveaux indices semble bien résister à des couvertures végétales éparses ou moyennement denses. Les coefficients de la régression sont près de l'unité, ce qui signifie que l'indice ATI corrige en partie les effets atmosphériques et du sol.

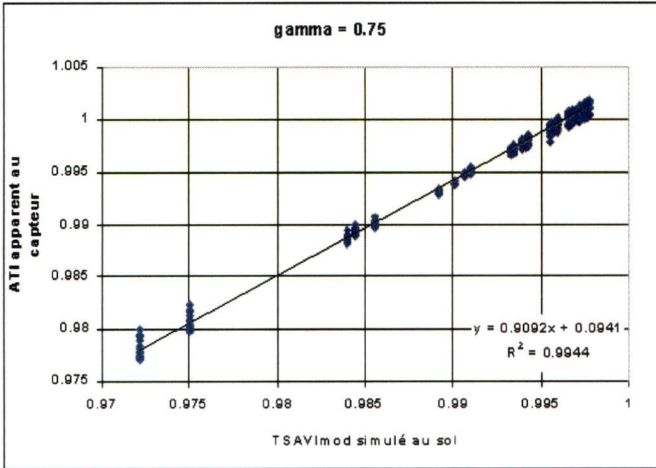
ATI simulé au capteur en fonction du TSAVImod simulé au sol pour différents types de sols, concentrations en eau, visibilités et LAI (facteur d'ajustement gamma variable)



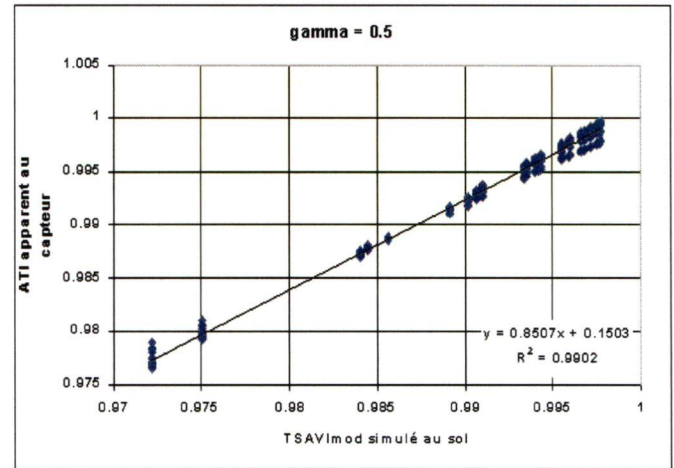
a)



b)



c)



d)

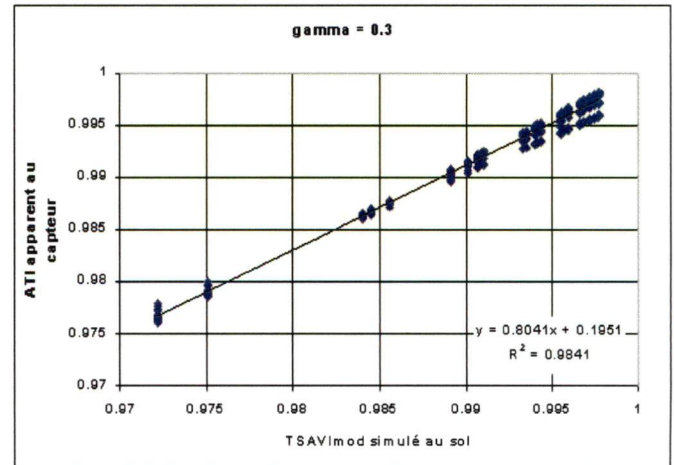
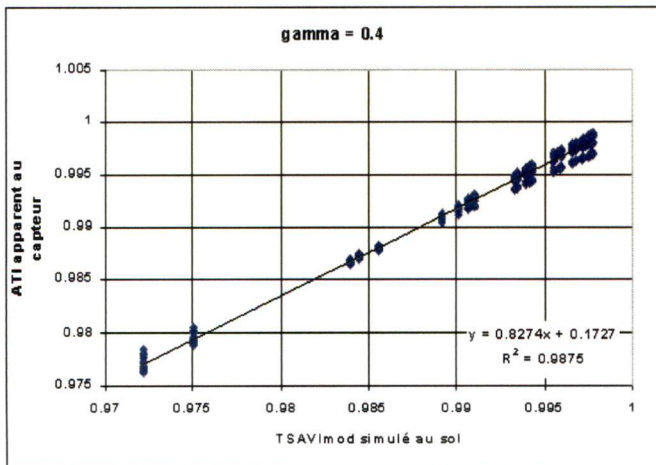


Figure 20 : Relation entre les indices ATI simulé au capteur et TSAVImod simulé au sol pour différents  $\gamma$

a)  $\gamma = 1.5$  b)  $\gamma = 1.0$  c)  $\gamma = 0.75$  d)  $\gamma = 0.5$  e)  $\gamma = 0.4$  f)  $\gamma = 0.3$

**Tableau 10** : Relations entre les indices ATI simulé au capteur et TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol pour différents  $\gamma$ 

$\gamma$	Équation linéaire $ATI = c_1 \times TSAVI_{mod} + c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indices
1.5	$1.0863 TSAVI_{mod} - 0.0762$	0.9932	0.0003
1.0	$0.968 TSAVI_{mod} + 0.0376$	0.9958	0.0002
0.75	$0.9092 TSAVI_{mod} + 0.0941$	0.9944	0.0001
0.5	$0.8507 TSAVI_{mod} + 0.1503$	0.9902	0.00008
0.4	$0.8274 TSAVI_{mod} + 0.1727$	0.9875	0.00007
0.3	$0.8041 TSAVI_{mod} + 0.1951$	0.9841	0.00004

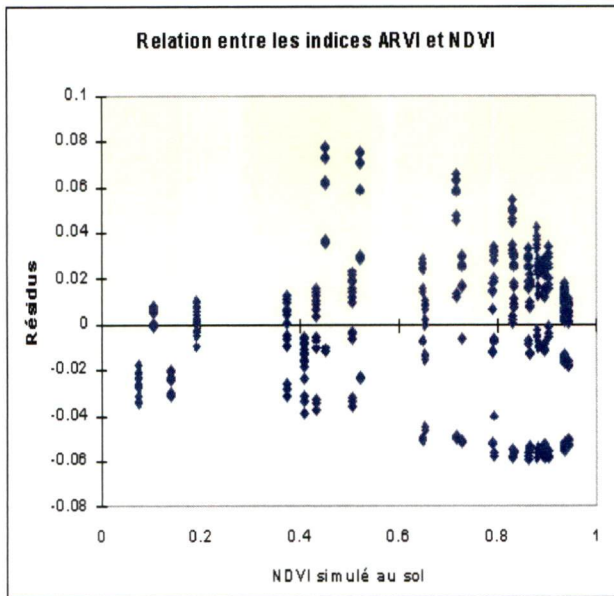
La figure 21 illustre la variation de la dispersion des résidus de la régression linéaire entre les indices apparents et les indices au sol. Les modèles d'extraction sont ceux utilisant les indices ARVI / NDVI, TSARVI / TSAVI et ATI / TSAVI<sub>mod</sub>.

Pour le modèle ARVI / NDVI (figure 21 a), la dispersion des résidus de la régression linéaire se situe entre  $-0.06$  et  $0.08$ . La dispersion des résidus de la régression linéaire diminue quand l'indice au sol tend vers zéro. La valeur minimale de la dispersion des résidus de la régression linéaire du modèle TSARVI / TSAVI (figure 21 b) est de  $-0.057$  et la valeur maximale est de  $0.05$ . La dispersion des résidus de la relation TSARVI / TSAVI augmente avec le taux de couverture végétal. Finalement, la dispersion des résidus de la relation ATI / TSAVI<sub>mod</sub> (figure 21 c) varie de  $-0.0015$  à  $0.0025$ . Cette dispersion des résidus de la relation ATI / TSAVI<sub>mod</sub> augmente au fur et à mesure que l'indice au sol diminue.

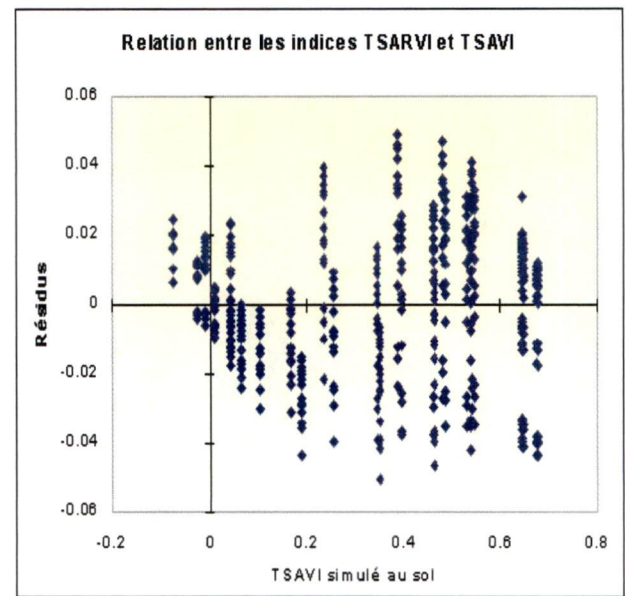
En conclusion, la relation entre les indices ATI / TSAVI<sub>mod</sub>, avec  $\gamma = 1.0$ , serait préférable pour effectuer l'inversion de l'épaisseur optique des aérosols. C'est cette relation qui possède la plus faible dispersion des points autour de la droite linéaire qui relie les indices. Elle se caractérise aussi par un coefficient de régression linéaire qui tend vers l'unité et une erreur quadratique moyenne entre les indices qui est inférieure à 1%.



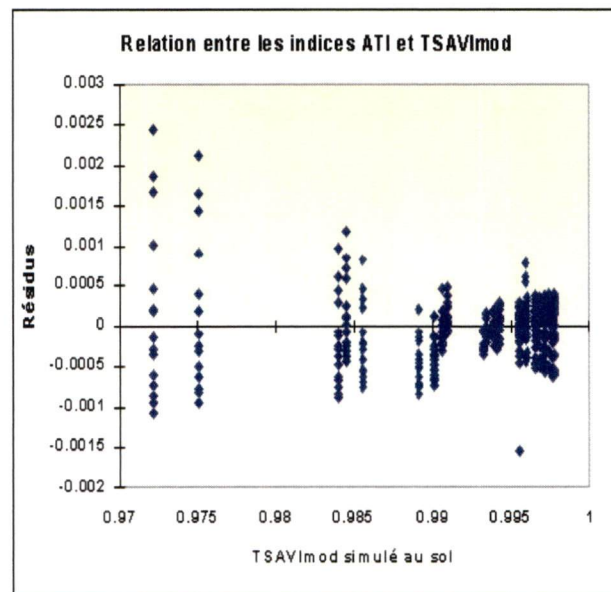
### Graphique des résidus entre les indices apparents au capteur et les indices au sol



a)



b)



c)

**Figure 21 :** Graphique de résidus entre les indices de végétation  
 a) ARVI / NDVI b) TSARVI / TSAVI c) ATI / TSAVI<sub>mod</sub>

## 6.2 Modèles d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols

Les modèles d'extraction servent à évaluer l'épaisseur optique des aérosols au-dessus de diverses couvertures végétales. Les modèles d'extraction analysés, soient ARVI / NDVI, TSARVI / TSAVI, ATI / TSAVI<sub>mod</sub> et DDV, ont tout d'abord été testés avec les valeurs de réflectances apparentes simulées au capteur. Ces réflectances apparentes ont été simulées dans les bandes spectrales de SPOT 4 VGT. Comme la valeur réelle de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm est connue (parce qu'elle était imposée au départ), il suffit de la comparer à celle obtenue par le modèle d'extraction. Afin de faire ressortir les différences d'épaisseur optique des aérosols à 550nm, des graphiques ont été tracés et ce, pour chacune des visibilités.

### 6.2.1 Modèle d'extraction DDV (*Dark Dense Vegetation*)

Le modèle d'extraction DDV a été testé à partir des valeurs de réflectances obtenues par simulation. Pour ce faire, la cible est considérée comme étant de la végétation dense, c'est à dire qu'elle possède une valeur de couverture végétale élevée ( $LAI = 6$ ). La figure 22 représente la valeur réelle d'épaisseur optique des aérosols à 550nm moins la valeur obtenue par le modèle d'extraction DDV pour les quatre types de sols utilisés lors des simulations. Le tableau 11 résume l'erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm avec le modèle d'extraction DDV appliqué sur le sol de type tourbe, humide et grossier (sol 7), selon différentes visibilités.

Pour le sol de type argile, humide et grossier (figure 22 a), la différence d'épaisseur optique des aérosols pour un couvert épars est d'environ  $-0.499$  pour une visibilité de 100 km et de  $-0.3501$  lorsque la visibilité est de 5 km. Pour un couvert dense la différence est de  $0.0015$  pour une visibilité de 5 km et de  $0.0009$  pour une visibilité de 100 km.

Pour le sol de type argile, sec et moyen (figure 22 b), la différence d'épaisseur optique des aérosols pour un  $LAI = 2$  est de  $-0.2569$  lorsque la visibilité est de 100 km et  $-0.1704$  lorsque la

visibilité est de 5 km. Pour un LAI de 6, la différence d'épaisseur optique est de 0.0028 lorsque la visibilité est de 100 km et de 0.0011 lorsque la visibilité est de 5 km.

Pour le sol de type tourbe, humide et grossier (figure 22 c), la différence d'épaisseur optique des aérosols, obtenue pour un LAI de 0.01, oscille entre  $-0.5753$  lorsque la visibilité est de 100 km et  $-0.4067$  lorsque la visibilité est de 5 km. Pour un couvert dense, la différence d'épaisseur optique se situe entre 0.0010 pour une visibilité de 100 km et 0.0028 pour une visibilité de 5 km.

Pour le sol de type tourbe, sec et moyen (figure 22 d), la différence d'épaisseur optique des aérosols lorsque le sol est nu se situe entre  $-0.6007$  lorsque la visibilité est de 100 km et  $-0.5066$  lorsque la visibilité est de 5 km. Lorsque le LAI est de 6, la différence d'épaisseur optique des aérosols est entre  $-0.0007$  pour une visibilité de 100 km et de 0.0014 pour une visibilité de 5 km.

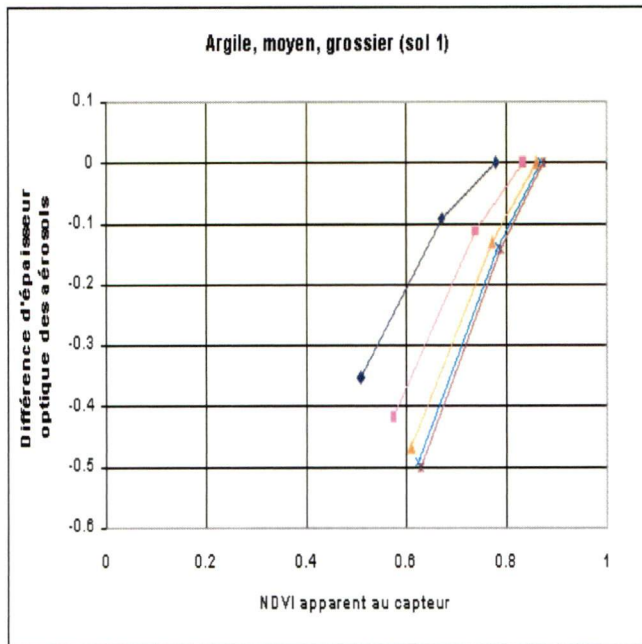
**Tableau 11** : Erreur quadratique moyenne du modèle d'extraction DDV

Erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique à 550nm selon la visibilité				
V = 5 km	V = 10 km	V = 23 km	V = 50 km	V = 100 km
0.0823	0.0618	0.0552	0.0547	0.0551

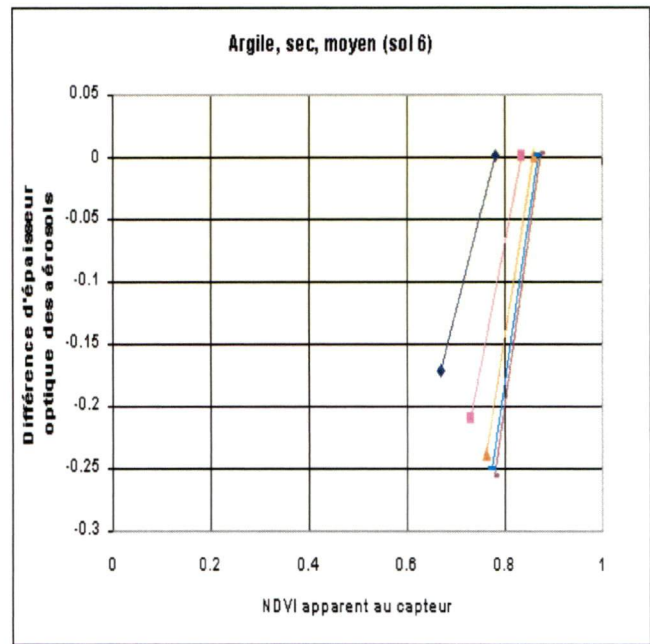
D'après la figure 22, plus l'indice de végétation croît, moins la différence entre la valeur réelle et la valeur simulée est grande. Le modèle DDV est particulièrement efficace à partir d'un NDVI  $> 0.7$ . Ceci est tout à fait prévisible puisque ce modèle doit être valide lorsque le couvert végétal est dense. La différence d'épaisseur optique des aérosols est apparente au fur et à mesure que la densité de végétation devient moyennement dense à épaisse. Plus la visibilité augmente, plus le modèle DDV surestime la valeur d'épaisseur optique des aérosols. L'application du modèle d'inversion DDV est restreinte à certains types de surfaces et taux de couvertures végétales.



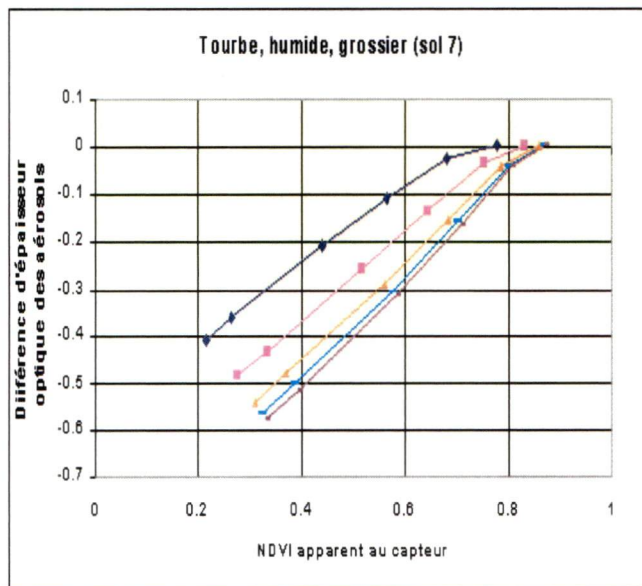
# **Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - valeur du modèle d'inversion DDV) en fonction du NDVI apparent au capteur**



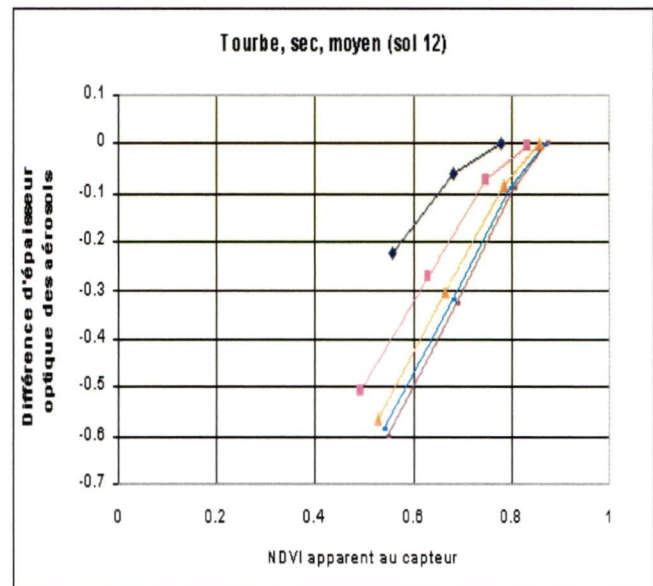
a)



b)



c)



d)

## **Légende**

◆ DDV(550nm) = 0.5874   
 ■ DDV(550nm) = 0.3254   
 ▲ DDV(550nm) = 0.1768   
 ■ DDV(550nm) = 0.1143   
 ■ DDV(550nm) = 0.0868

**Figure 22 : Différence d'épaisseur optique à 550nm (valeur réelle – modèle DDV) pour différents types de sol et visibilités**

a) argile, humide, grossier    b) argile, sec, moyen    c) tourbe, humide, grossier    d) tourbe, sec, moyen

### 6.2.2 Modèle extraction ARVI / NDVI

Le modèle d'extraction ARVI / NDVI a tout d'abord été testé avec les valeurs de réflectance apparente simulées au capteur. Les graphiques de la figure 23 représentent la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (soit la valeur réelle moins la valeur obtenue avec le modèle d'extraction ARVI / NDVI) en fonction de l'indice de végétation NDVI apparent au capteur selon les quatre types de sols utilisés lors des simulations. Les courbes continues représentent les résultats extraits avec le modèle ARVI / NDVI et les courbes pointillées représentent les résultats extraits précédemment avec le modèle DDV. Le tableau 12 résume l'erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm du modèle ARVI / NDVI appliqué sur le sol de type tourbe, humide et grossier (sol 7), selon chacune des visibilités.

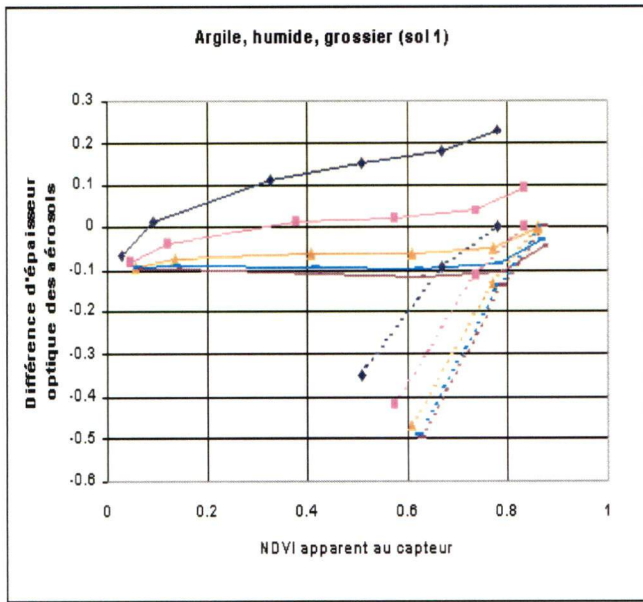
Le sol de type argile, sec et moyen (figure 23 b) possède une différence d'épaisseur optique des aérosols pouvant aller jusqu'à 0.6 lorsque le NDVI est inférieur à 0.1. Quand le NDVI est supérieur à 0.4, la différence d'épaisseur optique des aérosols, tend vers zéro, particulièrement pour de faibles valeurs initiales de la visibilité.

Pour les autres types de sols, la différence d'épaisseur optique lorsque le couvert est épars varie entre - 0.2 pour une visibilité de 100 km et 0.1 pour une visibilité de 5 km. Lorsque le couvert est dense, la différence d'épaisseur optique des aérosols oscille entre - 0.05 pour une visibilité de 100 km et 0.2 pour une visibilité de 5 km.

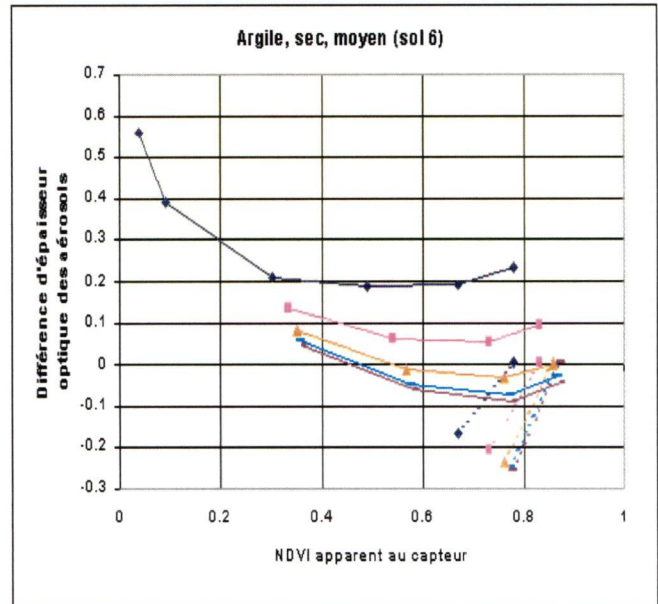
**Tableau 12** : Erreur quadratique moyenne du modèle ARVI / NDVI

Erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique à 550nm selon la visibilité				
V = 5 km	V = 10 km	V = 23 km	V = 50 km	V = 100 km
0.0443	0.0237	0.0184	0.0212	0.0233

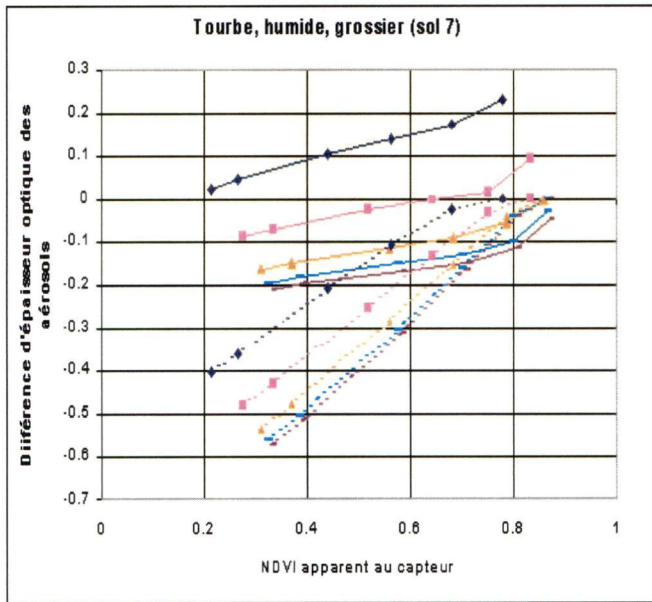
**Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - valeur du modèle d'inversion ARVI / NDVI et modèle DDV)  
en fonction du NDVI apparent au capteur**



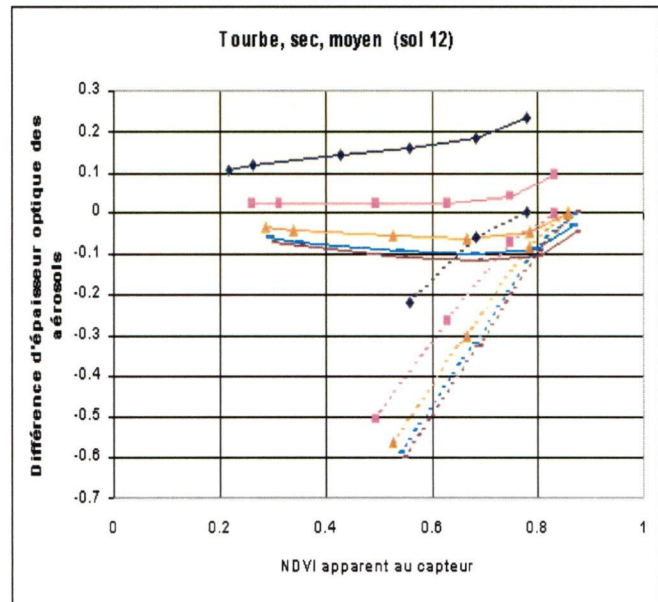
a)



b)



c)



d)

**Légende**



**Figure 23 : Différence d'épaisseur optique à 550nm (valeur réelle – modèles ARVI / NDVI et DDV )  
pour différents types de sol et visibilités.**

a) argile, humide, grossier   b) argile, sec, moyen   c) tourbe, humide, grossier   d) tourbe, sec, moyen



En somme, dès que le NDVI est inférieur à 0.6, le modèle ARVI / NDVI possède une différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm moindre que le modèle DDV. Malgré tout, le modèle ARVI / NDVI tend à surestimer la valeur d'épaisseur optique des aérosols au-dessus de la végétation moyennement dense et éparse où l'effet du sol sous-jacent est important. Cette surestimation prouve que cette relation est sensible aux effets du sol. Lorsque le couvert végétal est dense, l'application du modèle DDV reste tout de même préférable puisque la différence d'épaisseur optique des aérosols est alors plus faible.

### 6.2.3 Modèle d'extraction TSARVI / TSAVI

La figure 24 représente la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (soit la valeur réelle moins la valeur obtenue par les modèles d'extraction TSARVI / TSAVI (courbes continues) et DDV (courbes pointillées)) en fonction du NDVI apparent. Le tableau 13 résume l'erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm du modèle TSARVI / TSAVI appliqué sur le sol de type tourbe, humide et grossier (sol 7), selon chacune des visibilités.

Pour les sols de type argileux (figures 24 a et b), le modèle TSARVI / TSAVI extrait des valeurs de l'épaisseur optique des aérosols supérieures aux valeurs réelles lorsque le NDVI apparent au capteur est inférieur à 0.2. La différence d'épaisseur optique des aérosols du sol 1 (figure 24 a) varie alors entre  $-0.4$  pour une visibilité de 100 km et  $-0.18$  pour une visibilité de 5 km. Pour le sol 6 (figure 24 b), la différence d'épaisseur optique des aérosols varie entre  $-0.12$  et  $-0.05$  pour une visibilité de 100 km et 5 km.

Pour le sol 1, la valeur d'épaisseur optique simulée tend vers la valeur réelle lorsque la visibilité est de 23 km et que  $\text{NDVI} = 0.4$ . Dans ce cas, la différence d'épaisseur optique des aérosols est d'environ 0.009. Pour le sol 6, la valeur d'épaisseur optique simulée tend vers la valeur réelle lorsque le NDVI est de 0.12 et 0.7. Quand le couvert est complet, le modèle TSARVI / TSAVI possède une différence d'épaisseur optique des aérosols se situant entre  $-0.05$  pour une visibilité de 100 km et 0.15 pour une visibilité de 5 km.

Pour le sol 7 (figure 24 c), dès que le couvert est éparé, la différence d'épaisseur optique des aérosols varie entre  $-0.18$  pour une visibilité de 100 km et  $-0.12$  pour une visibilité de 5 km. Pour le sol 12 (figure 24 d) la différence d'épaisseur optique des aérosols varie entre 0.01 pour une visibilité de 100 km et 0.06 pour une visibilité de 5 km. Quand le NDVI est supérieur à 0.7, la différence d'épaisseur optique des aérosols oscille entre  $-0.05$  pour une visibilité de 100 km et 0.15 pour une visibilité de 5 km.

Lorsque la couverture végétale est moyennement dense et éparse, la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm est moindre en utilisant le modèle d'extraction TSARVI / TSAVI qu'en utilisant le modèle DDV. En effet, à partir de  $\text{NDVI} < 0.65$ , le modèle TSARVI / TSAVI permet une meilleure corrélation avec les valeurs réelles d'épaisseur optique des aérosols, bien que le modèle tende à surestimer l'épaisseur optique des aérosols lorsque le couvert est éparé. Pour un couvert complet, le modèle TSARVI / TSAVI tend à sous-estimer la valeur d'épaisseur optique des aérosols, particulièrement pour de faibles visibilités.

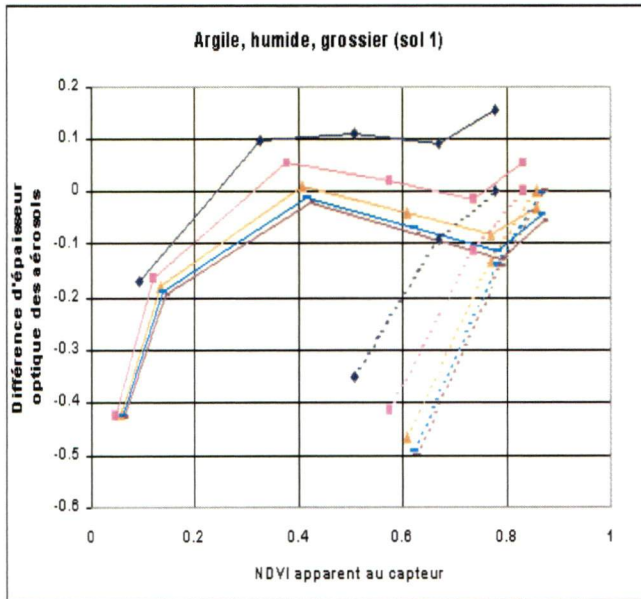
La figure 25 représente la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (soit la valeur réelle moins la valeur extraite des modèles TSARVI / TSAVI (courbes continues) et ARVI / NDVI (courbes pointillées)) en fonction du NDVI apparent au capteur. En comparant ces deux modèles d'extraction, il semble que le modèle TSARVI / TSAVI possède une certaine dépendance au sol, particulièrement pour les sols qui sont de types argileux (figures 25 a et b) et lorsque dont le taux de la couverture du sol est très faible. Cependant, dès que la présence de végétation au sol apparaît, la différence d'épaisseur optique des aérosols devient nettement plus faible avec le modèle TSARVI / TSAVI qu'avec les deux modèles précédents.

**Tableau 13 : Erreur quadratique moyenne du modèle TSARVI / TSAVI**

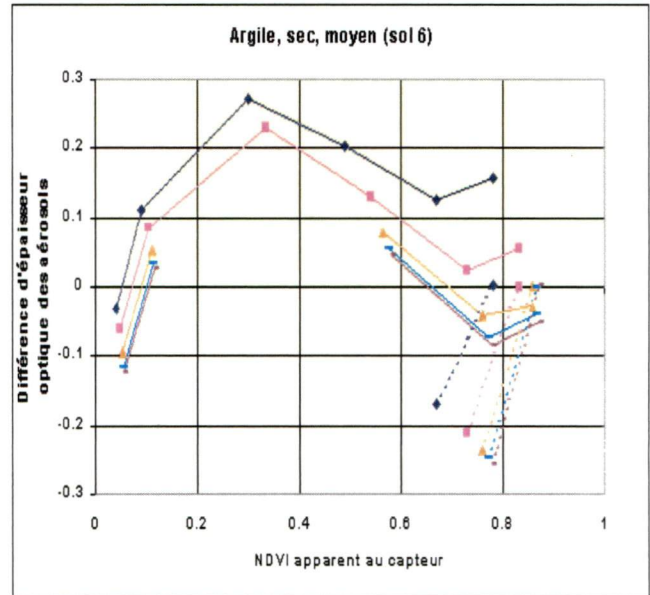
Erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique à 550nm selon la visibilité				
V= 5 km	V = 10 km	V= 23 km	V = 50 km	V = 100 km
0.0366	0.0257	0.0268	0.0285	0.0297



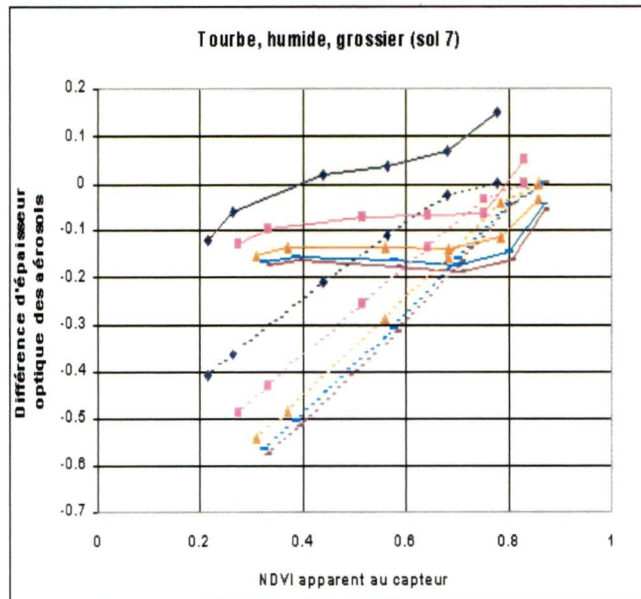
**Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - valeur obtenue du modèle TSARVI / TSAVI et du modèle DDV)  
en fonction du NDVI apparent au capteur**



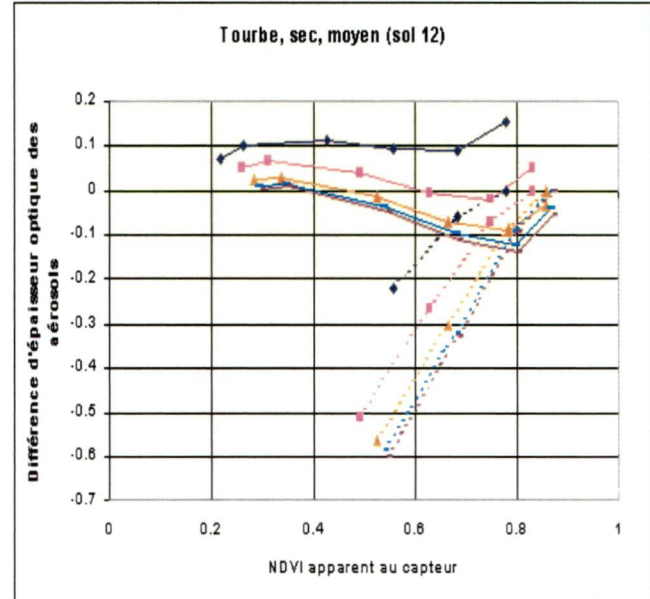
a)



b)

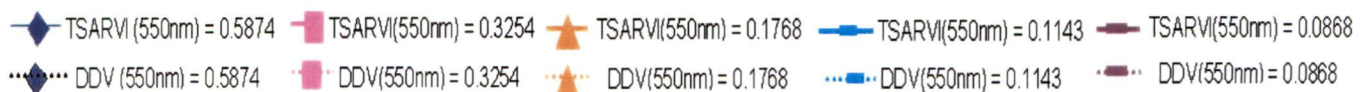


c)



d)

**Légende**

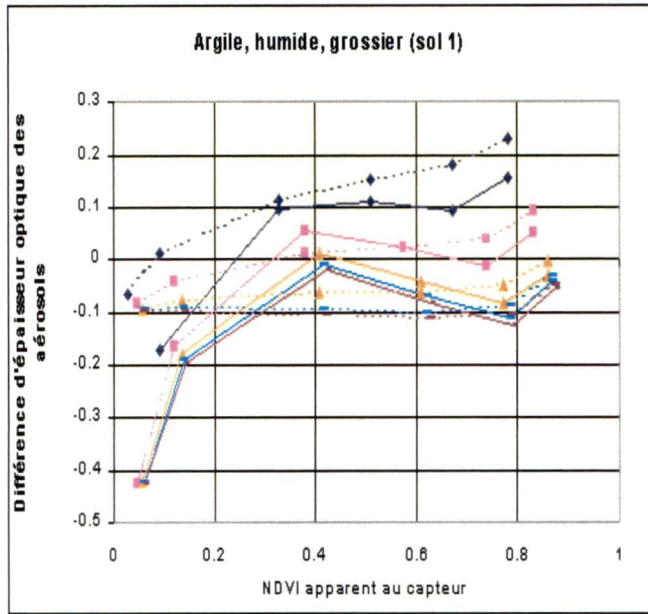


**Figure 24 : Différence d'épaisseur optique à 550nm (valeur réelle – modèles TSARVI / TSAVI et DDV)  
pour différents types de sol et visibilités**

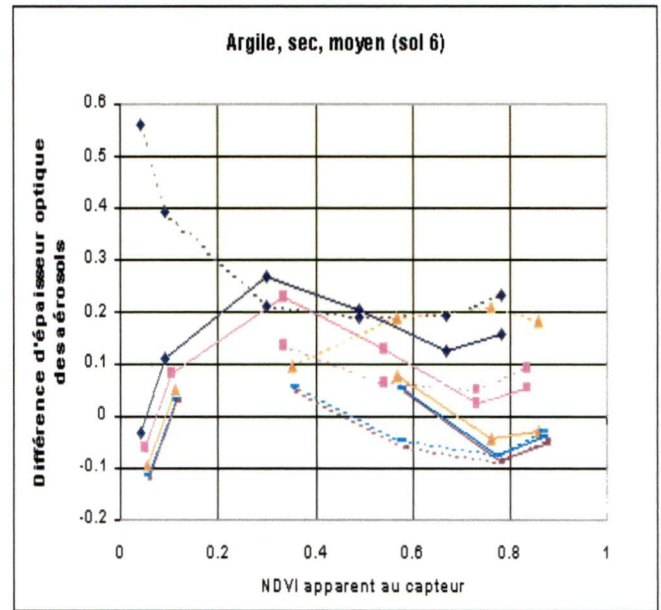
a) argile, humide, grossier   b) argile, sec, moyen   c) tourbe, humide, grossier   d) tourbe, sec, moyen



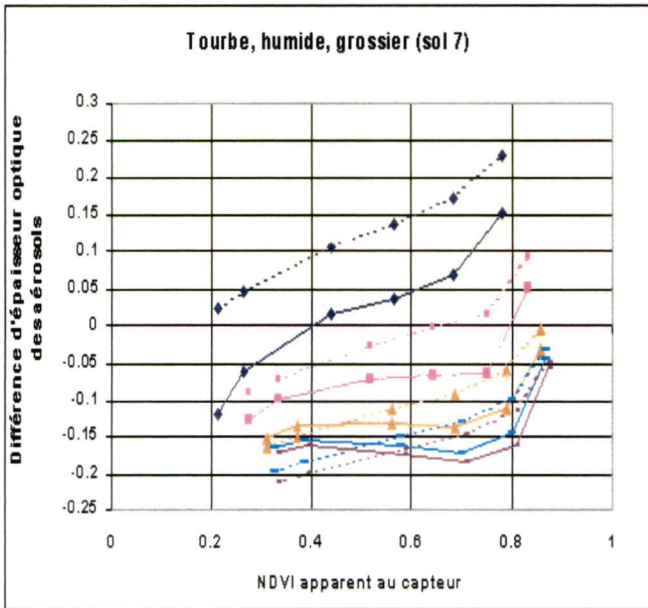
**Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - valeur obtenue du modèle TSARVI / TSAVI et du modèle ARVI / NDVI) en fonction du NDVI apparent au capteur**



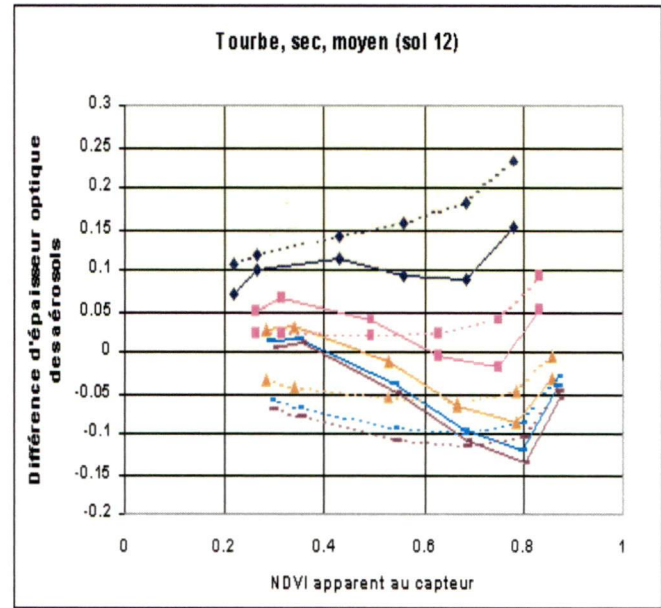
a)



b)

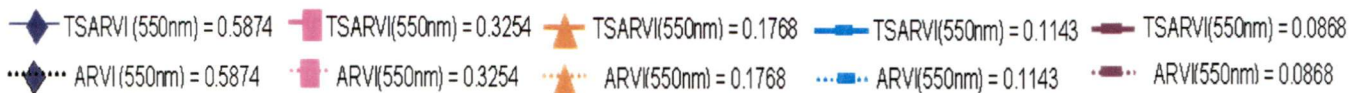


c)



d)

**Légende**



**Figure 25 : Différence d'épaisseur optique (valeur réelle – modèles TSARVI / TSAVI et ARVI / NDVI) pour différents types de sol et visibilités**

a) argile, humide, grossier   b) argile, sec, moyen   c) tourbe, humide, grossier   d) tourbe, sec, moyen

#### 6.2.4 Modèle d'extraction ATI / TSAVI<sub>mod</sub>

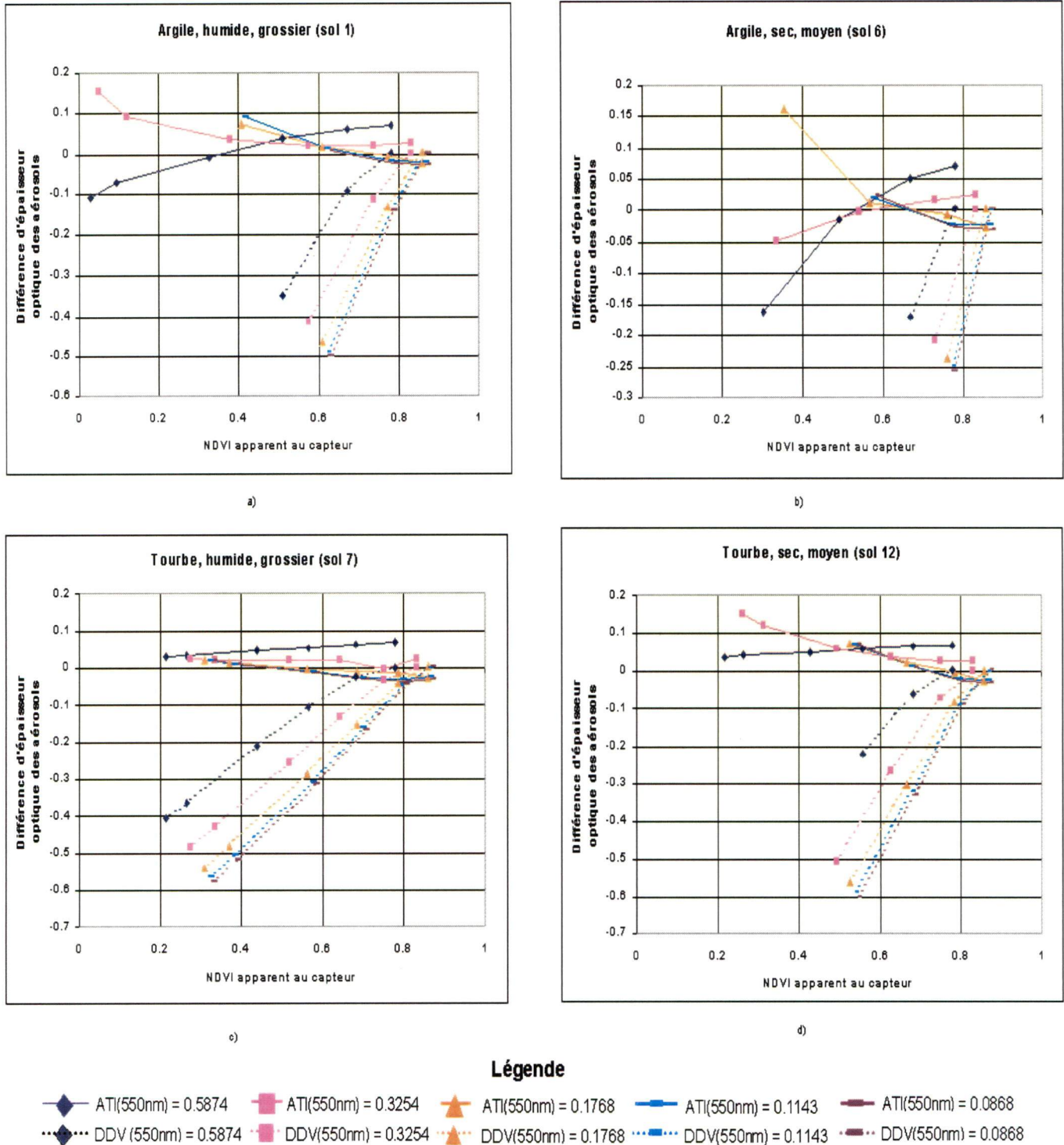
La figure 26 illustre la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (soit la valeur réelle moins la valeur obtenue des modèles ATI / TSAVI<sub>mod</sub> (courbes pleines) et DDV (courbes pointillées)) en fonction du NDVI apparent au capteur. Plusieurs courbes ont été tracées pour chacune des visibilités et chacun des types de sols. Le tableau 14 résume l'erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm du modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub>, en fonction de la visibilité, appliqué sur le sol de type tourbe, humide et grossier (sol 7).

Pour un sol de type argile, humide et grossier (figure 26 a), la différence d'épaisseur optique des aérosols, lorsque le couvert est épars, est de  $-0.1$  pour une visibilité de 5 km et de  $0.15$  pour une visibilité de 10 km. Le modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> n'a été en mesure d'extraire l'épaisseur optique des aérosols qu'à partir d'un NDVI supérieur à  $0.32$  (pour les visibilités supérieures à 10 km). Lorsque le couvert est complet, la différence d'épaisseur optique des aérosols oscille entre  $-0.02$  pour une visibilité de 100 km et  $0.08$  pour une visibilité de 5 km.

Pour un sol de type argile, sec et moyen (figure 26 b), la différence d'épaisseur optique des aérosols, obtenue lorsque le NDVI est de  $0.3$ , se situe à  $-0.15$  pour une visibilité de 5 km et à  $0.15$  pour une visibilité de 23 km. Pour un couvert dense, la différence d'épaisseur optique des aérosols est de  $-0.03$  pour une visibilité de 100 km et de  $0.06$  pour une visibilité de 5 km.

À partir d'un NDVI inférieur à  $0.3$ , le sol de type tourbe, humide, grossier (figure 26 c) possède une différence d'épaisseur optique des aérosols de  $0.02$  pour une visibilité de 100 km et de  $0.03$  pour une visibilité de 5 km. Dès que le NDVI est supérieur à  $0.7$ , la différence d'épaisseur optique des aérosols est de  $-0.03$  pour une visibilité de 100 km et de  $0.06$  pour une visibilité de 5 km.

**Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - valeur obtenue du modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> et du modèle DDV)  
en fonction du NDVI apparent au capteur**



**Figure 26 : Différence d'épaisseur optique à 550nm (valeur réelle – modèles ATI / TSAVI<sub>mod</sub> et DDV)  
pour différents types de sol et visibilités**

a) argile, humide, grossier b) argile, sec, moyen c) tourbe, humide, grossier d) tourbe, sec, moyen



Pour le sol de type tourbe, sec et moyen (figure 26 d), la différence d'épaisseur optique des aérosols, obtenue lorsque le NDVI est inférieur à 0.3, est de 0.03 pour une visibilité de 5 km et de 0.14 pour une visibilité de 10 km. Quand le NDVI est supérieur à 0.7, la différence d'épaisseur optique des aérosols est de - 0.03 pour une visibilité de 100 km et de 0.7 pour une visibilité de 5 km.

En général, la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm avec le modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> est moindre que celle provenant du modèle DDV et ce, particulièrement lorsque le NDVI est faible. En effet, dès que le NDVI est inférieur à 0.7, le modèle d'extraction ATI / TSAVI<sub>mod</sub> procure des valeurs d'épaisseurs optiques près des valeurs réelles.

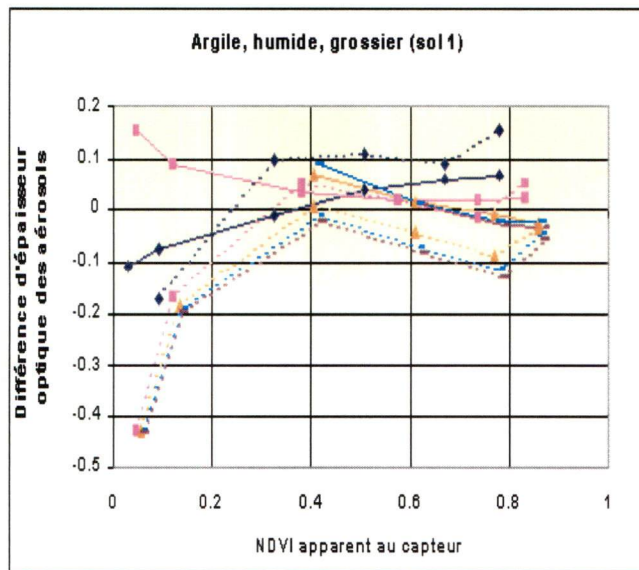
La figure 27 représente la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (soit la valeur réelle moins la valeur extraite avec les modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> (courbes continues) et TSARVI / TSAVI (courbes pointillées)) en fonction du NDVI apparent au capteur.

Ainsi, d'après les figures 26 et 27, lorsque le taux de couverture du sol est faible, le modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> fournit une meilleure corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs réelles que les modèles DDV et TSARVI / TSAVI. En général, la différence d'épaisseur optique des aérosols tend plus rapidement vers zéro avec l'application du modèle d'inversion ATI / TSAVI<sub>mod</sub>. Par contre, lorsque le taux de couverture est élevé, la différence d'épaisseur optique des aérosols est similaire d'un modèle à l'autre. Le modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> est particulièrement efficace sur les sols tourbeux. Toutefois, le modèle tend à surestimer la valeur d'épaisseur optique des aérosols sur les sols argileux et ce, notamment lorsque la visibilité est supérieure à 5 km.

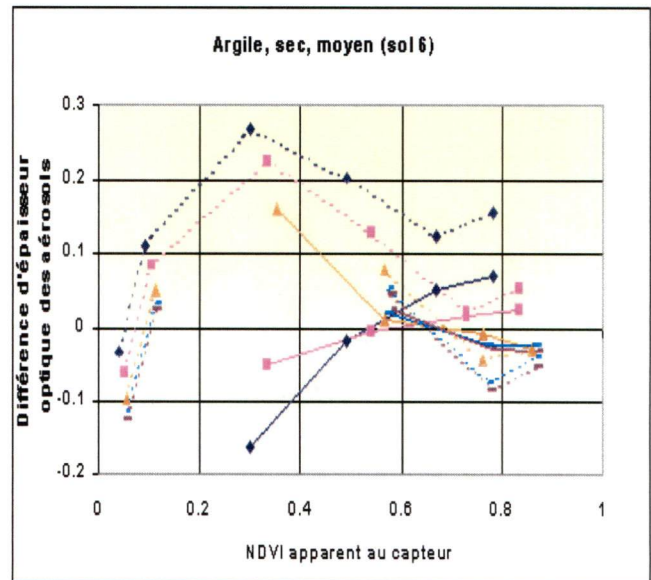
**Tableau 14** : Erreur quadratique moyenne du modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub>

Erreur quadratique moyenne de la différence d'épaisseur optique à 550nm selon la visibilité				
V = 5 km	V= 10 km	V = 23 km	V =50 km	V = 100 km
0.0379	0.0246	0.0210	0.0145	0.0133

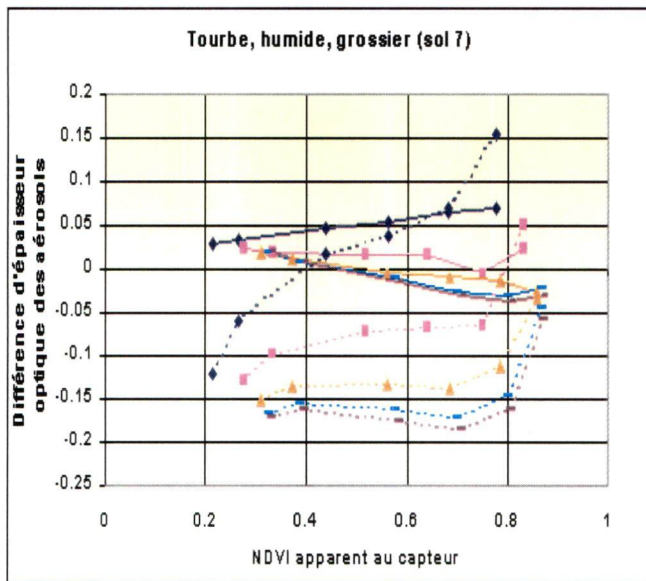
**Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - valeur obtenue du modèle ATI / TSAVI<sub>mod</sub> et du modèle TSARVI / TSAVI) en fonction du NDVI apparent au capteur**



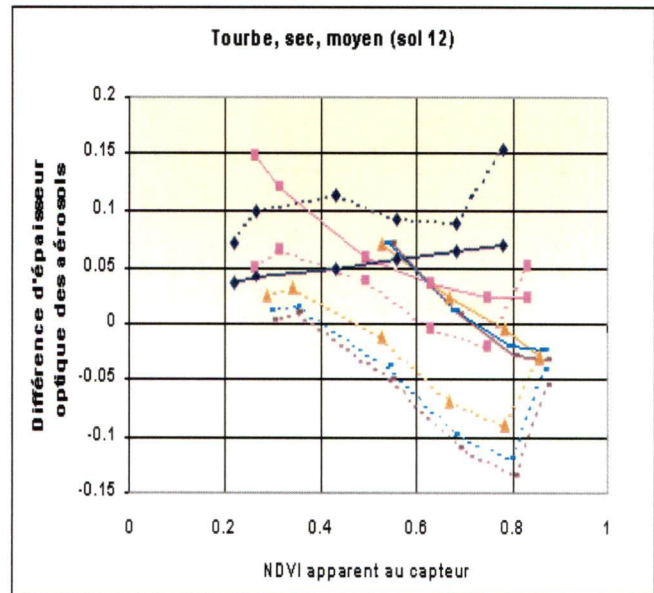
a)



b)

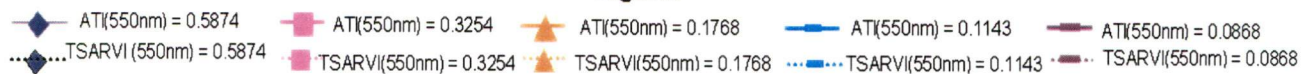


c)



d)

**Légende**



**Figure 27 : Différence d'épaisseur optique à 550nm (valeur réelle – modèles ATI / TSAVI<sub>mod</sub> et TSARVI / TSAVI) pour différents types de sols et visibilités**

a) argile, humide, grossier b) argile, sec, moyen c) tourbe, humide, grossier d) tourbe, sec, moyen



Le tableau 15 permet de comparer l'erreur quadratique moyenne pour tous les modèles d'extraction et ce, considérant tous les types de sols (argile, humide, grossier; argile, sec, moyen; tourbe, humide, grossier; tourbe, sec, moyen) et toutes les visibilitées (5, 10, 23, 50 et 100 km):

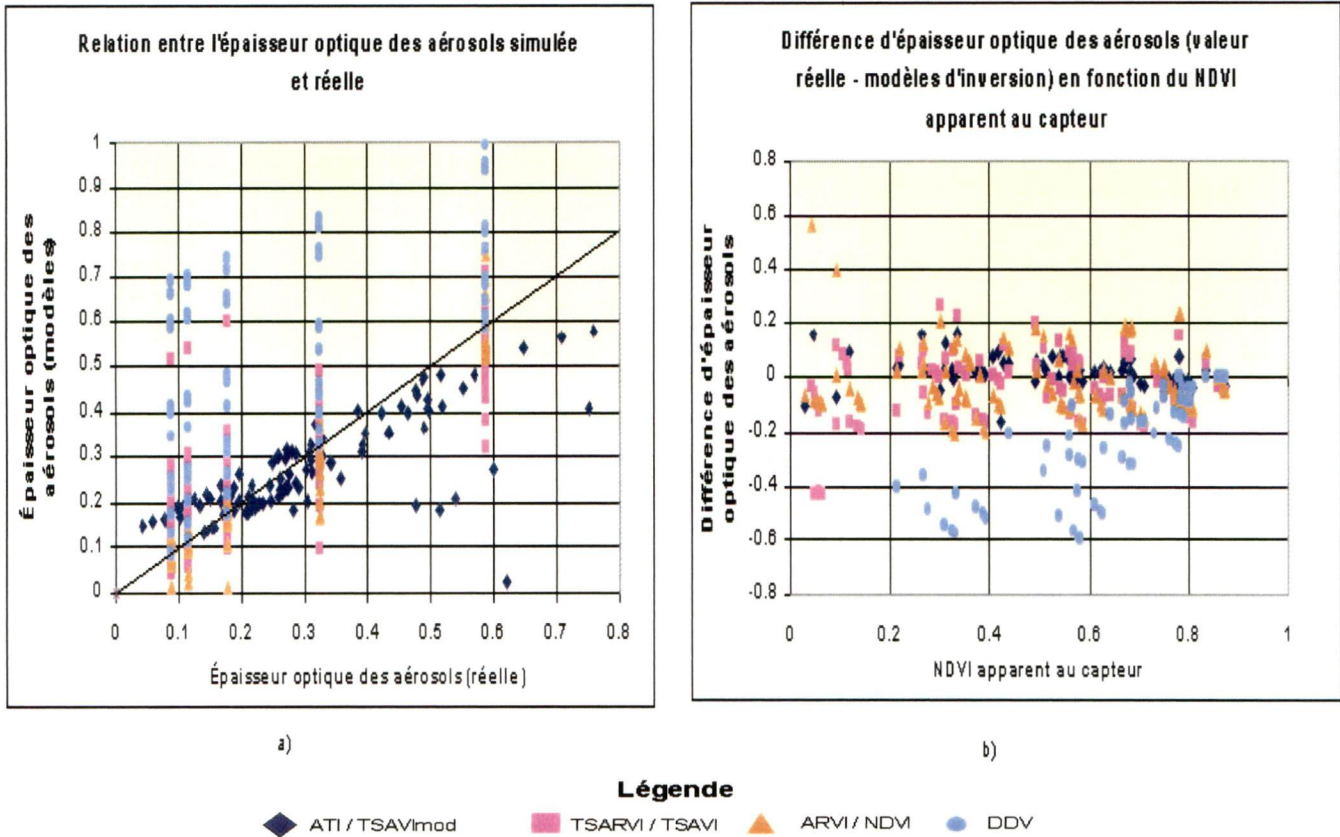
**Tableau 15** : Erreur quadratique moyenne des divers modèles d'extraction pour tous les types de sols et toutes les visibilitées considérées

<b>Modèles d'extraction</b>			
<b>DDV</b>	<b>ARVI / NDVI</b>	<b>TSARVI / TSAVI</b>	<b>ATI / TSAVI<sub>mod</sub></b>
0.0618	0.0261	0.0298	0.0223

L'erreur quadratique moyenne est nettement plus élevée avec le modèle d'extraction DDV, ce qui démontre sa faible utilité lorsque la couverture végétale est éparse. Ce modèle d'extraction est plus fiable lorsque le type de couvert végétal est connu. C'est le modèle ATIM (incorporant les indices de végétation) qui possède l'erreur quadratique moyenne la plus faible. L'implémentation de l'algorithme avec les indices TSARVI / TSAVI et ATI / TSAVI<sub>mod</sub> est plus complexe d'exécution (parce qu'il faut entre autre extraire la droite des sols nus) que le modèle DDV mais semblent efficace pour obtenir une épaisseur optique plus près des valeurs réelles et ce, dès que le couvert est moyennement dense. L'introduction de la droite des sols nus et du canal hybride permettent de minimiser l'effet du sol sous-jacent et de réduire les effets de l'atmosphère.

La figure 28 a) montre la relation entre les épaisseurs optiques des aérosols à 550nm obtenues par simulations des différents modèles d'extraction en fonction de la valeur réelle. La figure 28 b) illustre, pour tous les types de sols, la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm obtenue à partir des divers modèles en fonction du NDVI apparent au capteur. Selon cette figure et le tableau 15, la courbe du modèle d'extraction ATI / TSAVI<sub>mod</sub> est celle qui possède la différence d'épaisseur optique des aérosols la plus faible et ce, même lorsque le couvert végétal est épars. C'est donc cette relation entre les indices ATI et TSAVI<sub>mod</sub> qui sera considérée comme étant le modèle ATIM dans les prochaines sections. Cependant, le modèle DDV semble toujours plus efficace que le modèle ATIM lorsque la végétation est dense. L'utilisation du modèle DDV est optimisée pour des couverts végétaux denses. Ainsi, si la couverture végétale est dense et connue à priori, le modèle DDV permet l'obtention efficace de l'épaisseur optique des aérosols.





**Figure 28 :** a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm simulée en fonction de la valeur réelle  
b) Différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm en fonction du NDVI apparent

### 6.3 Effet des angles sur le modèle d'extraction ATIM

Les angles de visées et d'acquisitions sont des paramètres importants dans le processus de calcul des réflectances au sol. Ainsi, des simulations ont été effectuées en utilisant le modèle ATIM (la relation entre les indices ATI / TSAVImod, est employée) dans le but de vérifier l'influence des angles sur le modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols.

Les simulations des réflectances apparentes ont été menées pour un angle zénithal solaire constant ( $\theta_s$ ) de  $36.0^\circ$ , un angle zénithal de visée ( $\theta_v$ ) variant entre  $0.0^\circ$  et  $60.0^\circ$  (pas de rétrodiffusion), un angle azimutal solaire constant ( $\phi_s$ ) de  $160.0^\circ$ , un angle azimutal de visée constant ( $\phi_v$ ) de  $0.0^\circ$  et une surface de type Lambertienne. Sept valeurs de visibilités ont été utilisées : soient 5.0, 20.0, 35.0, 50.0, 65.0, 80.0 et 95.0 km. Le facteur d'ajustement utilisé pour le calcul de la réflectance du canal hybride est  $\gamma = 1.0$ . La droite des sols nus dans l'espace

apparent proche infrarouge / hybride, obtenue à partir des réflectances apparentes, permet d'acquérir les paramètres utiles au calcul de l'indice de végétation apparent ( l'indice ATI dans le cas présenté).

La figure 29 a) illustre la variation de la réflectance apparente du proche infrarouge en fonction des angles de visée pour différentes épaisseurs optiques des aérosols à 550nm et différents taux de la couverture du sol. Pour un sol nu, au fur et à mesure que l'angle de visée croît, la réflectance du proche infrarouge s'accroît légèrement même si celle-ci est très faible à cette longueur d'onde. La réflectance du proche infrarouge varie, selon la visibilité, entre 0.1343 et 0.1366 lorsque  $\theta_v = 0^\circ$  et entre 0.1385 et 0.1594 lorsque  $\theta_v = 60^\circ$ . L'effet de l'atmosphère est minime dans ce cas. Plus le LAI croît, plus la réflectance dans le canal proche infrarouge augmente. Néanmoins, pour un couvert végétal dense, plus l'angle de visée croît, plus la réflectance apparente du proche infrarouge tend à s'atténuer notamment à partir de  $\theta_v \approx 30^\circ$  où les conditions spéculaires sont importantes. La réflectance du proche infrarouge varie, selon la visibilité, entre 0.455 et 0.5053 pour  $\theta_v = 0^\circ$  et entre 0.4343 et 0.4897 pour  $\theta_v = 60^\circ$ .

La figure 29 b) illustre la variation de la réflectance du canal hybride en fonction de l'angle de visée et ce, pour plusieurs visibilités et taux de la couverture du sol. La différence entre la bande bleue et la bande rouge est plus importante pour un couvert dense que pour un sol nu. Pour un sol nu, plus l'angle de visée croît, plus la réflectance apparente du canal hybride tend à augmenter, jusqu'à ce que  $\theta_v \approx 30^\circ$  (conditions spéculaires), pour ensuite diminuer. La réflectance du canal hybride varie, selon la visibilité, entre 0.0742 et 0.0855 pour  $\theta_v = 0^\circ$  et entre 0.0707 et 0.0736 pour  $\theta_v = 60^\circ$ . Pour une couverture dense, deux comportements sont apparents. Plus l'épaisseur optique des aérosols et l'angle de visée augmentent, plus la réflectance du canal hybride tend à s'accroître. L'atmosphère fait en sorte d'augmenter la réponse spectrale dans le rouge ce qui entraîne l'accroissement de la réflectance du canal hybride. Par contre, si l'épaisseur optique des aérosols est faible, la réflectance du canal hybride tend à augmenter, jusqu'à ce que  $\theta_v \approx 30^\circ$  (conditions spéculaires), pour ensuite diminuer. La réflectance du canal hybride varie, selon la visibilité, entre - 0.0296 et - 0.0225 pour  $\theta_v = 0^\circ$  et entre - 0.0386 et - 0.0079 pour  $\theta_v = 60^\circ$ .



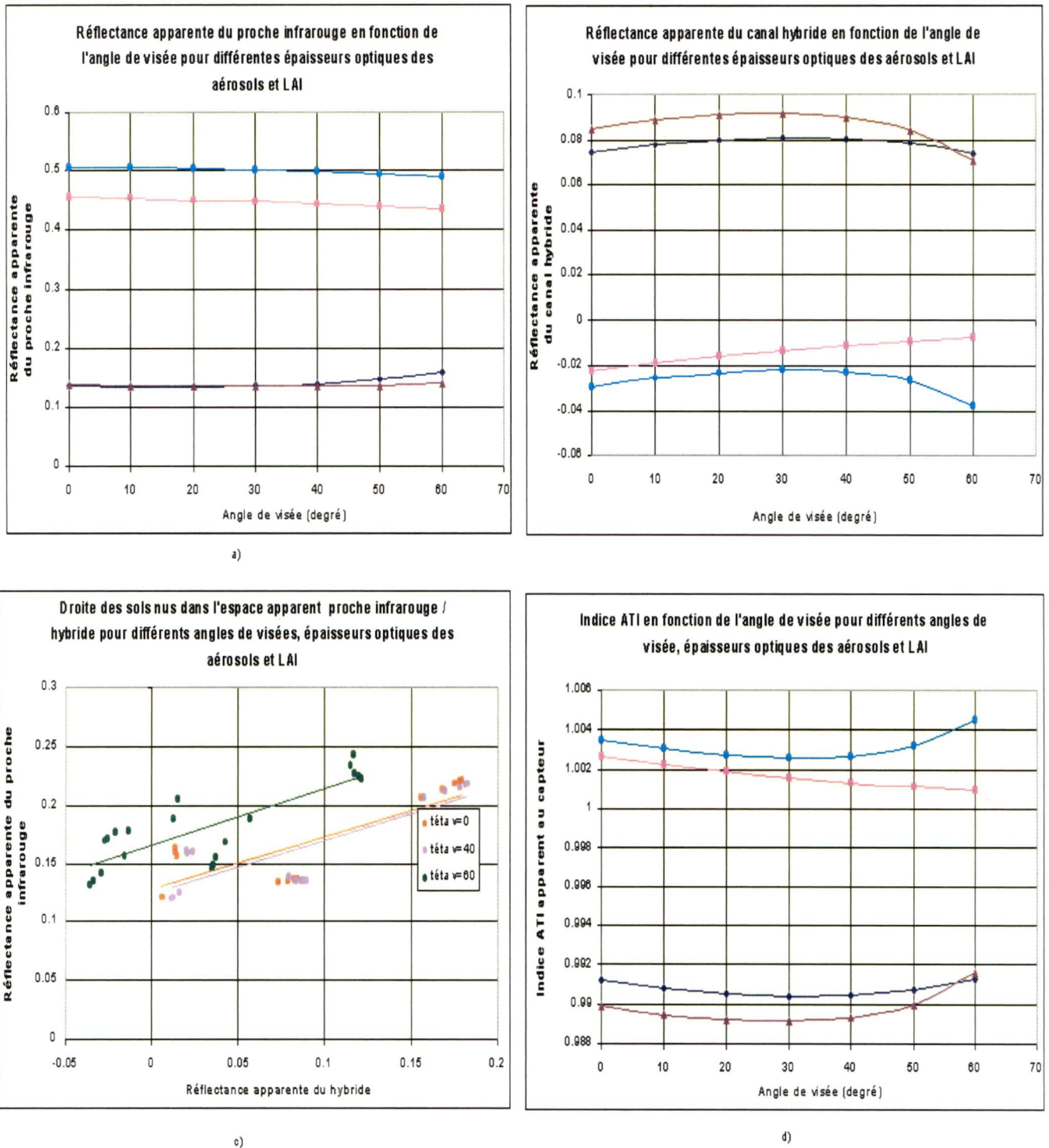
La figure 29 c) représente la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride et illustre l'effet de l'angle de visée. Cet effet est perceptible lorsque l'angle de visée est élevé ( $\theta_v = 60.0^\circ$  dans ce cas-ci). Il se manifeste par un décalage vers les faibles valeurs du canal hybride et les hautes valeurs du proche infrarouge. Ce phénomène illustre bien le comportement des canaux pris individuellement. Les effets atmosphériques sont plus prononcés lorsque l'angle croît. Le tableau 16, résume l'effet des angles de visée sur le calcul de la droite des sols nus. Il en ressort que plus l'angle de visée augmente, plus grande est la dispersion des points autour de la droite de régression entre les réflectances apparentes simulées du canal proche infrarouge et du canal hybride.

**Tableau 16** : Droite des sols nus dans l'espace apparent PIR / RB pour différents angles de visée

Angles de visée ( $\theta_v$ °)	Droite des sols nus $\rho_{PIR}^* = a_{PIR/RB} \times \rho_{RB}^* + b_{PIR/RB}$	Coefficient de régression $R^2$
0.0	$0.4501\rho_{RB}^* + 0.1276$	0.6741
40.0	$0.4497\rho_{RB}^* + 0.1245$	0.6742
70.0	$0.4896\rho_{RB}^* + 0.1655$	0.6681

Finalement, la figure 29 d) démontre l'effet des angles de visée sur l'indice de végétation apparent au capteur. La distribution pour un couvert épars est similaire à la distribution d'un couvert dense, mais plus faible en magnitude. L'indice de végétation a une réponse semblable à celle du proche infrarouge. Pour un couvert épars, l'atmosphère a comme effet d'augmenter la valeur d'indice de végétation. Dans ce cas, l'indice ATI varie, selon la visibilité, entre 0.990 et 0.991 pour un angle  $\theta_v = 0^\circ$  et entre 0.992 et 0.993 pour  $\theta_v = 60^\circ$ . La valeur d'indice est minimale dans le cas spéculaire (où  $\theta_v \approx 30^\circ$ ). Lorsque le couvert est dense, l'atmosphère a comme effet de restreindre la valeur de l'indice de végétation. La valeur de l'indice ATI varie, selon la visibilité, entre 1.002 et 1.0035 pour  $\theta_v = 0^\circ$  et entre 1.001 et 1.005 pour  $\theta_v = 60^\circ$ .





**Figure 29 : Effet des angles de visée**

a) Réflectance apparente du canal proche infrarouge b) Réflectance apparente du canal hybride  
c) Droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride d) Indice ATI apparent au capteur

L'effet des angles de visée sur les réflectances est important, notamment dans les conditions spéculaires. Le tableau 17, montre la relation linéaire entre les deux indices de végétation et six angles de visée utilisés. En général, plus l'angle de visée croît, plus il y a un décalage vers les fortes valeurs de ATI, notamment pour les couvertures végétales denses où l'effet de l'atmosphère se fait particulièrement évident.

La figure 30 illustre la relation entre l'indice de végétation ATI apparent et l'indice de végétation  $\text{TSAVI}_{\text{mod}}$ , au sol pour les différentes valeurs d'angles zénithaux de visée ( $\theta_v$ ). D'après la figure 30 a), plus l'angle de visée croît, plus la pente de la régression entre les indices tend à diminuer ce qui a comme conséquence de réduire la contribution de l'indice au sol dans le calcul de l'indice apparent selon la relation linéaire appliquée par le modèle ATIM. Une relation polynomiale de deuxième ordre permet de relier la pente à l'angle de visée  $-2 \times 10^{-3} \theta_v^2 + 9 \times 10^{-3} \theta_v + 0.8997$  avec un coefficient  $R^2 = 0.9718$ .

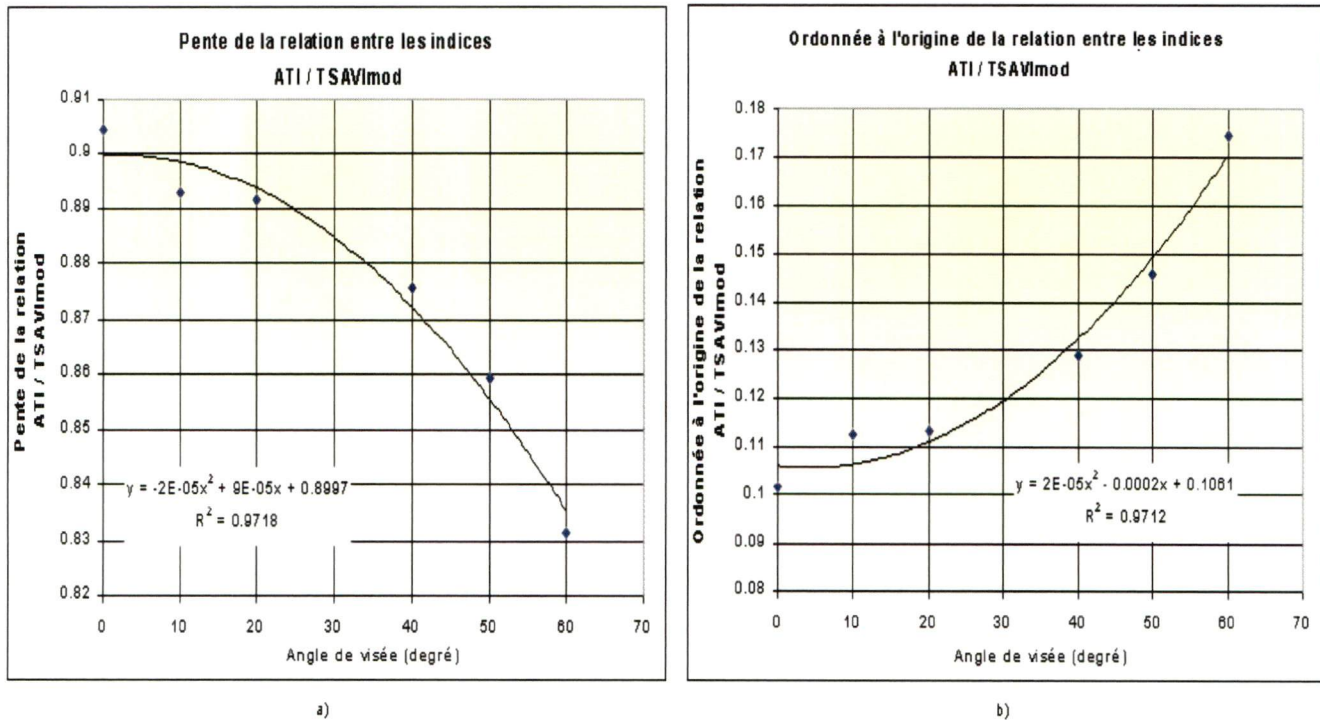
**Tableau 17** : Relation entre les indices ATI et  $\text{TSAVI}_{\text{mod}}$  pour différents angles de visée

$\theta_v$ (°)	$\text{ATI} = c_1 \times \text{TSAVI}_{\text{mod}} + c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indices
0.0	$0.9043 \text{TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1015$	0.9858	0.001
10.0	$0.8927 \text{TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1124$	0.9968	0.001
20.0	$0.8916 \text{TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1132$	0.9961	0.0009
40.0	$0.8758 \text{TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1288$	0.9958	0.0009
50.0	$0.8593 \text{TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1456$	0.9913	0.001
60.0	$0.8315 \text{TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1744$	0.9998	0.0012

L'ordonnée à l'origine de chacune des droites, reliant les indices ATI et  $\text{TSAVI}_{\text{mod}}$ , a été tracée à la figure 30 b) en fonction de l'angle zénithal de visée. Les valeurs varient de 0.1015 à 0.1744, selon l'angle de visée. La différence des ordonnées à l'origine entre les valeurs d'angle de visée de 0.0° et 60.0° est d'environ 26 %. Plus l'angle de visée augmente, plus l'ordonnée à l'origine reliant les indices apparent et au sol est grande, ce qui pour conséquence l'augmentation générale

de l'indice apparent au capteur. Une régression polynomiale de deuxième ordre offre une meilleure corrélation entre l'angle de visée et l'ordonnée à l'origine :  $2 \times 10^{-3} \theta_v^2 - 0.0002 \theta_v + 0.10162 \times 10^{-5}$  avec  $R^2 = 0.9712$ . Cette relation permettrait de calculer l'ordonnée à l'origine en connaissant l'angle de visée.

**Pente et ordonnée à l'origine de la relation entre les indices de végétation ATI / TSAVImod simulés pour différents angles de visée en fonction de l'angle de visée**



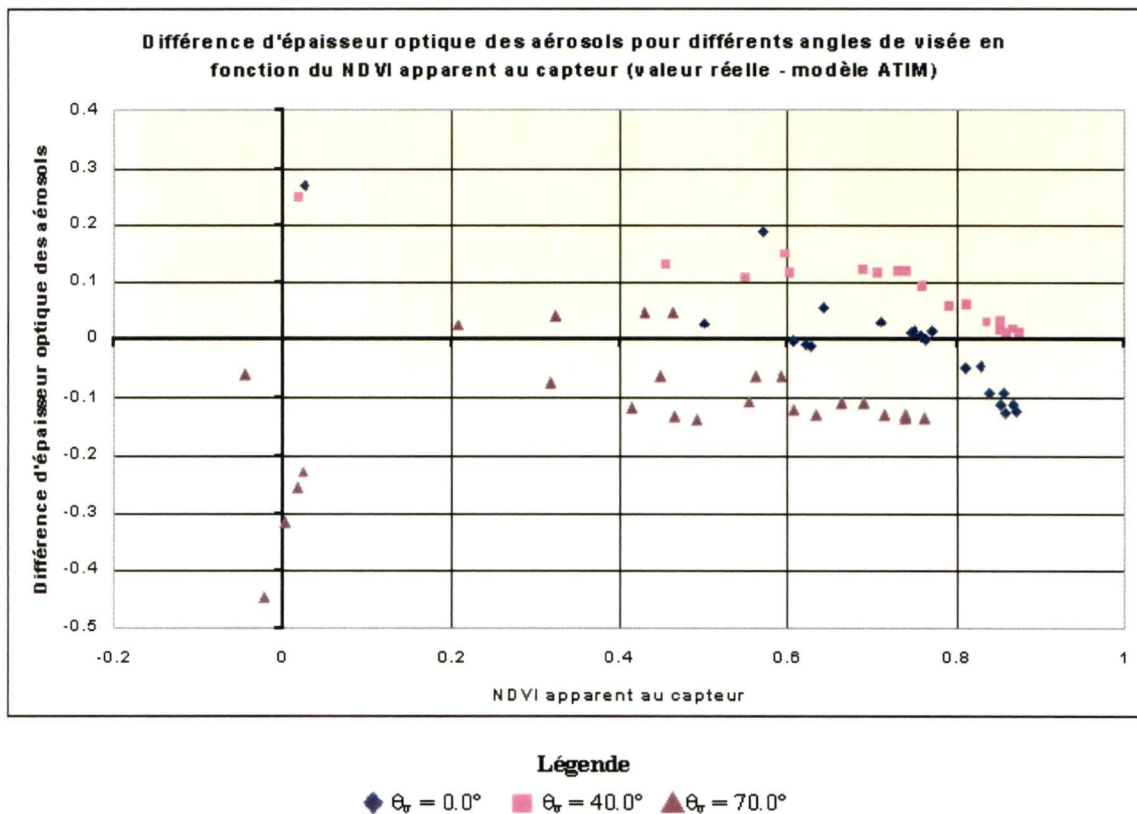
**Figure 30 :** a) Pente de la relation entre les indices ATI simulé au capteur et TSAVImod au sol pour différents angles de visée  
b) Ordonnée à l'origine de la relation entre les indices ATI et TSAVImod pour différents angles de visée

L'épaisseur optique des aérosols a été inversée à partir de l'équation reliant les indices de végétation pour  $\theta_v = 0^\circ$ , afin de vérifier l'influence des angles de visée sur le modèle d'extraction ATIM. La figure 31 montre la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (valeur réelle moins valeur simulée avec le modèle ATIM) en fonction du NDVI apparent au capteur. Le tableau 18 résume l'erreur quadratique moyenne obtenue entre la valeur réelle et la valeur simulée à partir de réflectances apparentes simulées selon les angles de visée  $\theta_v = 0^\circ, 40^\circ, 70^\circ$  et pour l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols effectuée lorsque  $\theta_v = 0^\circ$ .



**Tableau 18** : Erreur quadratique moyenne de l'épaisseur optique à 550nm pour différents angles de visée

Angles de visée ( $\theta_v$ )	Erreur quadratique moyenne
0°	0.0224
40°	0.0259
70°	0.0246

**Figure 31** : Différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm pour différents angles de visée

Selon la figure 31, la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm avec le modèle ATIM est plus élevée lorsque le couvert végétal est de faible densité, suivant la même tendance que les graphiques précédents. Lorsque l'angle de visée est de 70.0°, la différence d'épaisseur optique des aérosols se situe entre - 0.45 et 0.025 pour un sol nu et entre - 0.13 et - 0.06 pour un couvert dense. Pour un angle de visée de 40.0°, la différence d'épaisseur optique des aérosols est de 0.25

pour un couvert épars et se situe entre 0.01 et 0.12 pour un couvert dense. Pour un angle de visée de  $0.0^\circ$ , la différence d'épaisseur optique des aérosols est de 0.27 pour un couvert épars et varie de  $-0.122$  et  $0.015$  pour un couvert dense

En conclusion, le modèle ATIM est sensible aux effets des angles et semble surestimer l'épaisseur optique des aérosols lorsque l'angle de visée est élevé ( $\theta_v = 70^\circ$ ). Toutefois, le modèle ATIM tend à sous-estimer les valeurs d'épaisseurs optiques des aérosols lorsque l'angle de visée est de  $40^\circ$ . Dans ces conditions, la limite optimale à l'application du modèle ATIM serait  $\theta_v \leq 40^\circ$ . Il est également possible d'ajuster le modèle avec un angle de visée variable tel que montré dans le tableau 17.

#### **6.4 Effet du type d'aérosols sur le modèle d'extraction ATIM**

Le modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols ATIM (avec les différentes relations entre les indices apparent et au sol) semble relativement bien fonctionner, en comparaison avec le modèle DDV, pour plusieurs types de surfaces et taux de couverture végétale et ce, lorsque les aérosols sont de type continental. Afin de connaître les limites à l'application du modèle ATIM sur certains types d'aérosols, des simulations ont été effectuées avec des aérosols de type urbain, désertique et continental.

Dans un premier temps, il faut simuler les valeurs de réflectances apparentes pour des aérosols de type urbain et désertique, à partir des réflectances au sol dans chacun des canaux. Les paramètres, dans le cas d'aérosols de type urbain et continental, sont les suivants : des angles  $\theta_s = 36.0^\circ$  ;  $\theta_v = 0.0^\circ$  ;  $\phi_s = 160.0^\circ$  et  $\phi_v = 0.0^\circ$ , une concentration en eau de  $1.42 \text{ g/cm}^2$ , un taux de couverture du sol variant entre 0.01 et 6.0 ainsi que trois visibilité : 10.0, 23.0 et 50.0km. Pour les aérosols de type désertique, les simulations ont été effectuées en fonction des paramètres suivants : des angles  $\theta_s = 20.0^\circ$  ;  $\theta_v = 30.0^\circ$  ;  $\phi_s = 160.0^\circ$  et  $\phi_v = 0.0^\circ$ , une concentration en eau de  $1.42 \text{ g/cm}^2$ , un taux de couverture du sol variant entre 0.01 et 6.0 ainsi que trois visibilité : 5.0, 23.0 et 100.0 km et un sol de type sablonneux.

Ces valeurs de réflectances apparentes permettent de calculer la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride. C'est à partir de cette droite des sols nus que les indices de végétation seront établis et que la relation reliant les indices apparents et au sol (ATI et TSAVI<sub>mod</sub> dans le cas présenté) sera calculée. La figure 32 illustre la relation entre les indices de végétation pour les aérosols de type urbain, continental et désertique. Parce que la réflectance des sols nus de type sablonneux est très élevée, la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride, pour des aérosols de type désertique, est la même que celle obtenue précédemment pour des aérosols de type continental. Le tableau 19 résume les équations reliant les indices ATI simulé au capteur et TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol pour des aérosols de type continental, urbain et désertique.

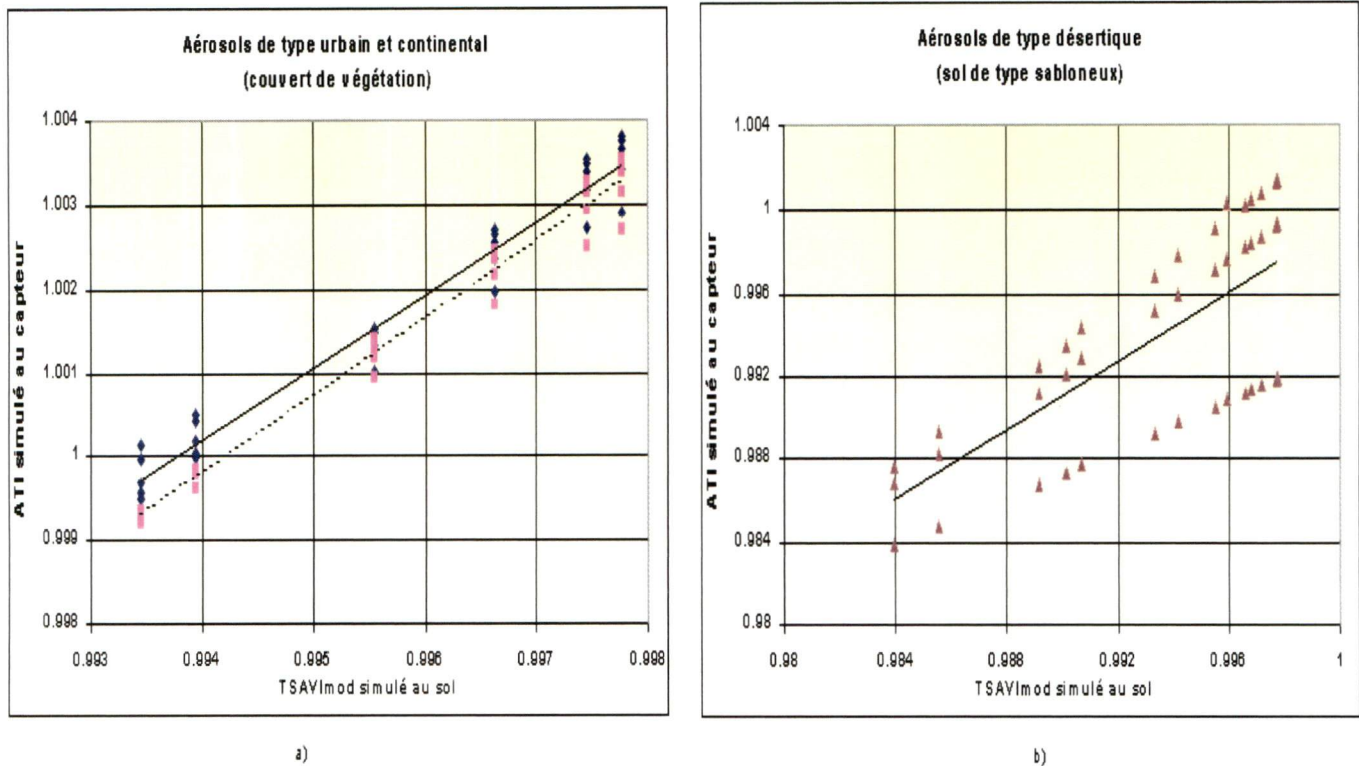
**Tableau 19** : Relation entre les indices ATI simulé au capteur et TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol pour divers types d'aérosols

Type d'atmosphère	ATI = $c_1 \times \text{TSAVI}_{\text{mod}} + c_2$	Coefficient de régression $R^2$	Erreur quadratique moyenne entre les indices
Continental	$0.9213 \text{ TSAVI}_{\text{mod}} + 0.0841$	0.9807	0.0010
Urbain	$0.8652 \text{ TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1397$	0.9653	0.0011
Désertique	$0.8361 \text{ TSAVI}_{\text{mod}} + 0.1633$	0.5271	0.0005

Selon la figure 32, le changement de type d'aérosols amène des variations dans la relation entre les indices de végétation. Pour des aérosols de type urbain (figure 32 a), l'indice apparent oscille, selon la visibilité, entre 0.9995 et 1.0 pour un couvert éparé et entre 1.0029 et 1.0037 pour un couvert dense. Pour des aérosols de type continental (figure 32 a), l'indice apparent varie, selon la visibilité, entre 0.9993 et 0.9995 pour un couvert éparé et entre 1.0027 et 1.0036 pour un couvert dense. Finalement, pour des aérosols de type désertique (figure 32 b), l'indice apparent varie, selon la visibilité, entre 0.9839 et 0.9878 pour un couvert éparé et entre 0.992 et 1.001 pour un couvert dense.



### Relation entre les indices ATI simulé au capteur et TSAVI<sub>mod</sub> simulé au sol pour différents types d'aérosols



**Figure 32 :** Relation entre les indices ATI et TSAVI<sub>mod</sub> pour différents types d'aérosols

a) Aérosols de type continental et urbain avec couvert de végétation

b) Aérosols de type désertique et sol de type sablonneux

Le modèle ATIM a été utilisé avec les données simulées pour différentes visibilités et taux de couverture végétale afin d'obtenir la valeur d'épaisseur optique des aérosols pour différents types d'aérosols selon plusieurs taux de couverture au sol. Les données ont été inversées pour des aérosols de type continental. La nature des aérosols peut entraîner une dépendance spectrale de l'épaisseur optique des aérosols. La figure 33 a) présente la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm, c'est à dire la valeur réelle moins la valeur des modèles ATIM (pour des réflectances simulées selon des aérosols de type continental et urbain) et DDV (pour des réflectances simulées selon des aérosols de type urbain) en fonction du NDVI apparent au

capteur. Chacune des courbes de la figure 33 b) représentent la différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm, soit la valeur réelle moins la valeur du modèle ATIM pour des aérosols de type désertique et pour différentes visibilités. Le tableau 20 résume l'erreur quadratique moyenne entre la valeur réelle et la valeur inversée, pour chaque types d'aérosols.

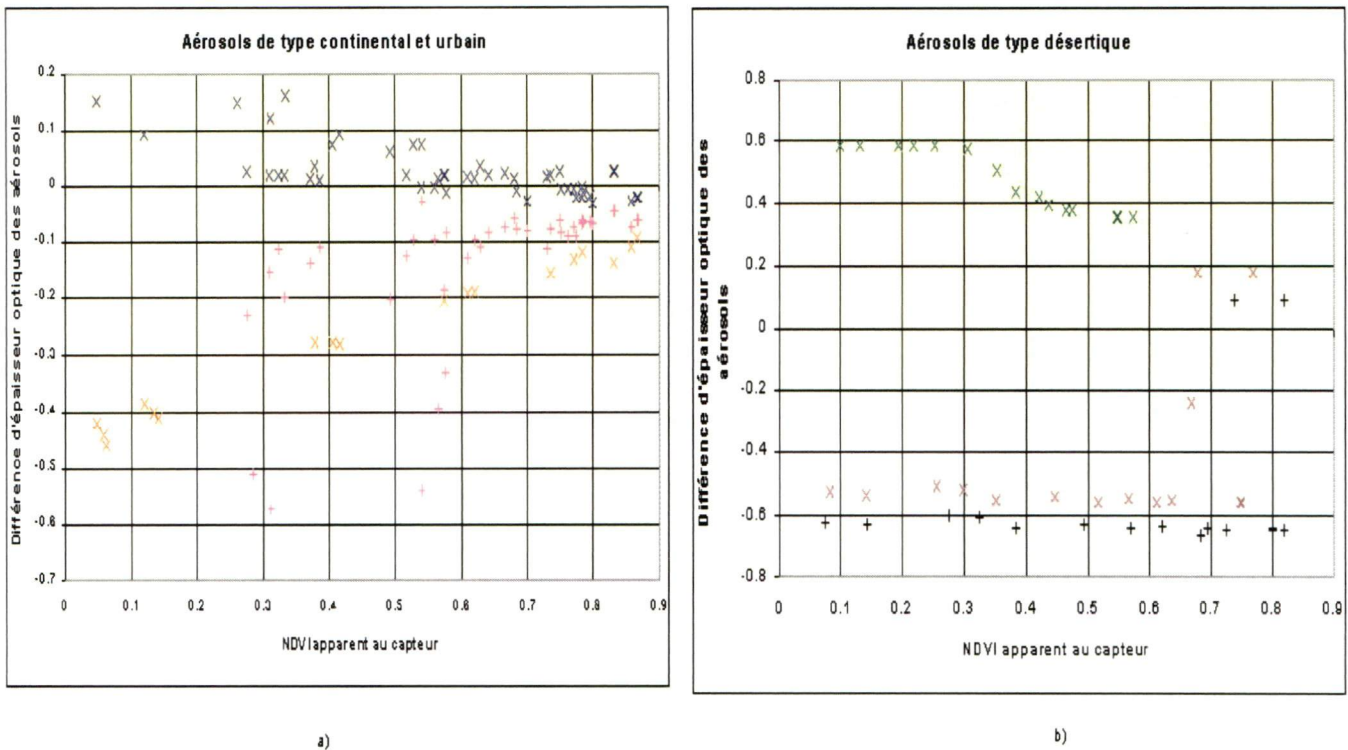
**Tableau 20** : Erreur quadratique moyenne du modèle d'extraction ATIM (considérant un modèle d'aérosols constants de type continental) pour différents types d'aérosols

Type d'aérosols	Erreur quadratique moyenne
Continental (ATIM)	0.0115
Urbain (ATIM)	0.0229
Désertique (ATIM)	0.0387

Pour des aérosols de type urbain (figure 33 a), la différence d'épaisseur optique des aérosols augmente à partir d'un NDVI inférieur à 0.6. La différence d'épaisseur optique des aérosols varie entre  $-0.5730$  et  $-0.0263$ . À partir d'un NDVI supérieur à 0.6, la différence d'épaisseur optique des aérosols se situe entre  $-0.11$  et  $-0.046$ . Le modèle ATIM a donc tendance à surestimer la valeur d'épaisseur optique des aérosols lorsque les aérosols est de type urbain et ce, particulièrement lorsque le couvert est épars.

Pour des aérosols de type continental (figure 33 a), la différence d'épaisseur optique des aérosols augmente à partir d'un NDVI inférieur à 0.4. Les valeurs de l'épaisseur optique des aérosols se situent alors entre  $-0.011$  et  $0.16$ . Pour un NDVI supérieur à 0.4, la différence d'épaisseur optique des aérosols se situe entre  $-0.022$  et  $0.036$ . Le modèle ATIM tend à sous-estimer la valeur d'épaisseur optique des aérosols, particulièrement lorsque le couvert est épars.

### Différence d'épaisseur optique des aérosols (valeur réelle - modèle d'inversion ATIM) en fonction du NDVI apparent au capteur



**Figure 33 :** Différence d'épaisseur optique des aérosols à 550nm (valeur réelle – modèle d'extraction)

a) Atmosphères de type continental et urbain b) Atmosphère de type désertique

Pour des aérosols de type désertique (figure 33 b) et une visibilité de 5 km, la différence d'épaisseur optique des aérosols se situe entre 0.58 et 0.42 en fonction du couvert végétale. Pour une visibilité de 23 km, la différence d'épaisseur optique des aérosols oscille entre - 0.6 et - 0.2. Lorsque la visibilité est de 100 km, la différence d'épaisseur optique des aérosols est de - 0.6 et peut aller jusqu'à 0.087 lorsque le couvert est dense, ce qui n'est généralement pas le cas aux endroits où se trouve ce type d'aérosols. Le modèle ATIM surestime nettement les valeurs d'épaisseur optique des aérosols pour tous les couverts lorsque les visibilités sont de 23 km et 100 km. Par contre, pour une visibilité de 5 km, le modèle ATIM sous-estime les valeurs d'épaisseur optique des aérosols.



Le modèle de transfert radiatif « SMAC », exploité pour obtenir la réflectance au sol, utilise des aérosols de type continental. Cependant, il est clair que le type d'aérosols influence les valeurs de la réflectance obtenues et par le fait même les indices de végétation. Le modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols ATIM est sensible au type d'aérosols et sa connaissance réduirait considérablement les erreurs sur l'épaisseur optique des aérosols.

## 7. Synthèse des résultats

### 7.1 Relation entre les indices de végétation

L'effet de la végétation augmente la réflectance dans le proche infrarouge tandis que celle dans le rouge diminue à cause l'absorption de la chlorophylle à cette longueur d'onde. Le sol contribue à la diminution de la réflectance du canal proche infrarouge, tout en augmentant celle de canal rouge, ce qui entraîne une réduction nette de l'indice de végétation. Des pics d'absorption sont apparents vers 470 nm et 670 nm. Ils représentent l'absorption de la chlorophylle. Des pics d'absorption, qui sont causés par l'eau, sont également apparents vers 1446 nm, 1922 nm. La réflectance s'atténue au fur et à mesure que la longueur d'onde est supérieure à 2200 nm. Dans le spectre des sols nus, des pics d'absorption causés par l'eau sont apparents vers 492 nm, 1429 nm et 1905 nm.

Les indices de végétation séparent la végétation du sol nu. C'est l'indice TSAVI qui permet la plus grande discrimination du sol nu. L'indice  $\text{TSAVI}_{\text{mod}}$ , par une optimisation des paramètres de la droite des sols nus, caractériserait les couverts végétaux épars indépendamment du sol.

En général, l'épaisseur optique des aérosols a comme effet de diminuer la réflectance apparente du proche infrarouge et d'augmenter celle du rouge et du bleu, particulièrement au-dessus de la végétation dense. Ceci entraîne une diminution nette de l'indice de végétation. Pour de faibles couvertures végétales, les indices de végétation ne discriminent pas efficacement les effets de l'atmosphère parce que l'effet du sol est plus important et qu'il influence la réflectance au

capteur. Ceci est remarquable, particulièrement pour l'indice NDWI qui possède des valeurs négatives ou positives selon le type de sol et l'humidité contenue dans le sol. Généralement, un sol nu sera caractérisé par un NDWI négatif.

C'est l'indice TSARVI qui offre la meilleure discrimination des effets du sol et de l'atmosphère. Lorsque le couvert est dense, l'indice NDWI possède une faible dispersion des valeurs de l'indice, ce qui signifie que cet indice minimise les effets de l'atmosphère. L'indice ATI, par une optimisation des paramètres de la droite des sols nus, caractériserait les couverts végétaux épars indépendamment des effets du sol et des effets de l'atmosphère.

Dans le cas idéal d'une atmosphère très claire (faible épaisseur optique des aérosols), la relation entre les indices de végétation au sol et apparent devrait être près de l'unité. Lorsque l'épaisseur optique des aérosols s'accroît, la dispersion des points autour de la droite de régression augmente. Un facteur d'ajustement élevé ( $\gamma = 1.5$ ) fait en sorte de diminuer la valeur du canal hybride, par la forte contribution du canal bleu. Ceci amène une moins grande sensibilité aux propriétés optiques de l'atmosphère, particulièrement pour des couvertures végétales denses. Plus le facteur d'ajustement est faible, plus la dépendance aux effets atmosphériques devient importante à cause de la présence du canal rouge. Un faible facteur d'ajustement ( $\gamma = 0.3$ ) augmente les valeurs du canal hybride et entraîne une plus grande sensibilité de ce canal à l'atmosphère. En réalité, il est difficile d'employer un seul facteur d'ajustement pour toutes les applications et tous les types d'atmosphère. L'optimisation du modèle ATIM devrait permettre l'application d'un seul facteur d'ajustement selon les différentes caractéristiques de l'atmosphère.

## **7.2 Les modèles d'extraction**

D'après les figures 22 à 27, plus l'indice de végétation croît, moins la différence entre la valeur réelle d'épaisseur optique et la valeur obtenue des modèles d'extraction est grande. À partir d'un NDVI supérieur à 0.65, le modèle DDV offre une meilleure corrélation avec les valeurs réelles d'épaisseurs optiques des aérosols que les autres modèles. Ceci est tout à fait prévisible puisque ce modèle doit être efficace particulièrement lorsque le couvert végétal est dense.



En général, plus la visibilité est petite (5 km), plus les modèles d'extraction tendent à sous-estimer la valeur calculée de l'épaisseur optique des aérosols. Ceci est particulièrement évident au-dessus de la végétation dense, où les effets atmosphériques sont les plus importants. Lorsque le couvert est épars, tous les modèles d'extraction ont tendance à surestimer la valeur d'épaisseur optique des aérosols. L'effet du sol nu est alors plus important que celui de l'atmosphère et il induit une dépendance des modèles d'extraction aux taux de couverture végétale

La relation linéaire entre les indices apparents et au sol, soit le modèle ATIM, offre des variantes de la méthode ARVI / NDVI en incorporant la droite des sols nus. Ce modèle ATIM offre une bonne estimation de l'épaisseur optique des aérosols lorsque la densité de végétation est moyenne. Selon les simulations théoriques, c'est la relation entre les indices de végétation ATI et  $TS\text{AVI}_{\text{mod}}$  semble plus résistante aux effets du sol (par l'introduction de la droite des sols nus) et de l'atmosphère (par l'introduction du canal hybride) ce qui la rend particulièrement efficace pour l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols.

D'après les simulations théoriques, le modèle ATIM permet l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols sur des surfaces dont la couverture végétale n'est pas connue a priori. Les différentes relations entre les indices de végétation (ARVI / NDVI,  $TS\text{ARVI}$  /  $TS\text{AVI}$  et ATI /  $TS\text{AVI}_{\text{mod}}$ ) offre une bonne estimation de l'épaisseur optique des aérosols. La raison est que ces modèles permettent de minimiser l'effet de l'atmosphère tout en conservant l'information au sol sur les images. Les résultats du modèle ATIM ne sont pas nécessairement meilleurs que ceux obtenus avec le modèle DDV. Néanmoins, ils permettent de croire que l'implémentation d'un algorithme basé sur des indices de végétation pourrait être significativement préférable au modèle DDV aux endroits où le couvert végétal n'est pas connu a priori. Par ailleurs, l'application d'un facteur d'ajustement qui varie selon chaque types de sol pourrait amener une plus grande corrélation entre les indices et donc améliorer l'efficacité du modèle d'extraction ATIM (avec les différentes combinaisons d'indices). De même, le calcul de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride serait différent si on employait un facteur d'ajustement variant selon le type de couvert. En fait, la sensibilité du modèle ATIM aux variations de la droite des sols nus devrait vérifiée afin d'optimiser le modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols.



### 7.3 Effets des angles et du type d'aérosols

Plus l'angle de visée et l'épaisseur optique des aérosols croissent, plus l'indice de végétation s'accroît. Les effets atmosphériques sont plus importants lorsque l'angle de visée est oblique. C'est donc la diffusion du signal qui est importante pour de grands angles de visée. L'extraction de l'épaisseur optique des aérosols se faisait à  $\theta_v = 0.0^\circ$ , c'est donc cette relation qui possède la meilleure corrélation. Lorsque l'angle de visée augmente, le modèle ATIM tend à surestimer l'épaisseur optique des aérosols, cette surestimation étant due au fait que dans le modèle, les relations de base (équations 38 à 42) sont définies avec un angle fixé à  $\theta_v = 0.0^\circ$ . Ceci démontre que le modèle d'extraction ATIM est sensible aux effets des angles de visée.

La différence entre la valeur réelle d'épaisseur optique des aérosols et celle obtenue avec le modèle ATIM est plus importante lorsque la simulation est effectuée sur un sol de type sablonneux et des aérosols de type désertique (figure 33 b). La dispersion des valeurs d'indice apparent est due à l'épaisseur optique des aérosols et au type de sol. Les indices de végétation semblent être particulièrement influencés par le type de sol et de d'aérosols. En effet, plus le couvert végétal devient dense et l'épaisseur optique élevée, plus l'indice apparent tend à sous-estimer la valeur de l'indice de végétation. Des facteurs pouvant amener cet indice à sous-estimer la valeur réelle sont : les paramètres de la droite des sols nus qui ne sont pas ajustés à ce type d'aérosols (cette droite des sols est calculée à partir des réflectances apparentes) et la forte brillance des sols nus ce qui influence par le fait même l'indice de végétation apparent. Plus un sol est sec, plus élevée est la réflectance dans l'infrarouge de courte longueur d'onde (cette longueur d'onde sert à l'extraction des pixels de sol nu). L'apport de l'indice NDWI pourrait peut être permettre de mesurer l'eau présente.

## 8. Applications aux images satellitaires

Les modèles d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols ATIM et DDV ont été appliqués aux images satellitaires des sites BOREAS. Les images utilisées sont celles de SPOT 4 VGT. Le modèle ATIM utilise les indices de végétation ATI et TSAVI<sub>mod</sub> (ce sont ces indices qui sont employés dans le modèle ATIM appliqué aux images parce que selon les simulations théoriques, c'est cette combinaison qui offre la plus grande corrélation avec les valeurs réelles). Le facteur d'ajustement ( $\gamma$ ), employé pour le calcul de la réflectance dans le canal hybride, est celui pour lequel la droite simulée entre les indices de végétation a la plus faible dispersion (soit  $\gamma = 1.0$ ). Ces images possèdent les paramètres résumés au tableau 21 :

**Tableau 21** : Paramètres d'acquisition des images SPOT 4 VGT, sites Thompson et Waskesiu, Canada

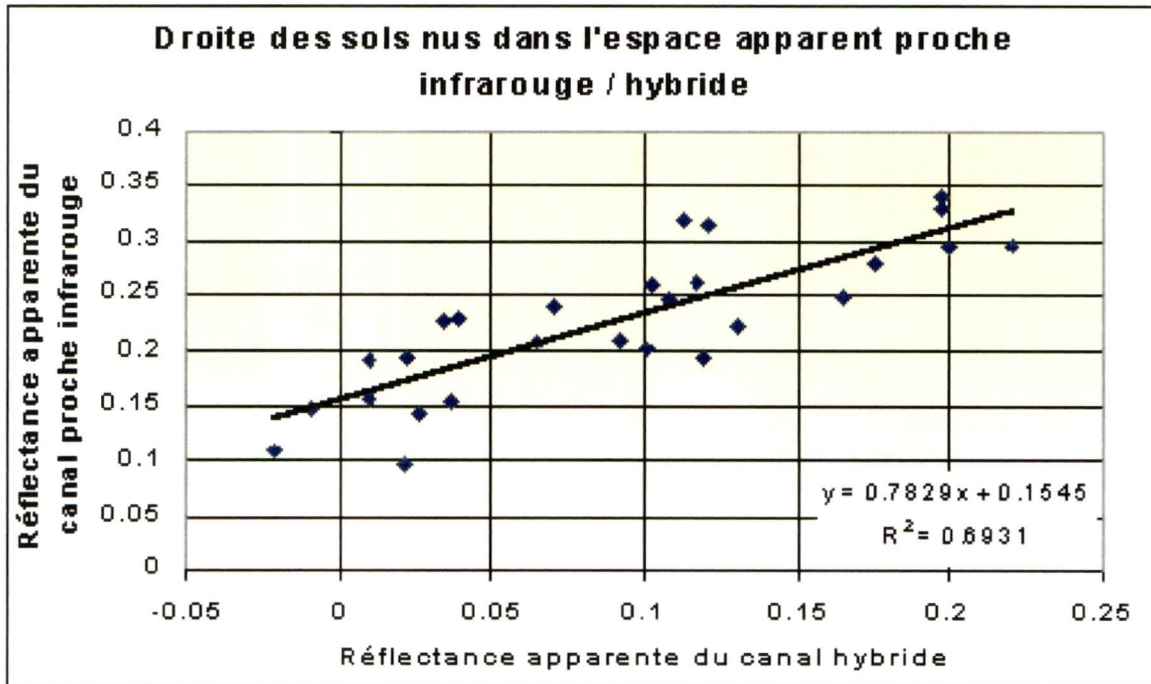
Date d'acquisition	Angle zénithal solaire ( $\theta_{smin}$ ; $\theta_{smax}$ )	Angle azimutal solaire ( $\phi_{smin}$ ; $\phi_{smax}$ )	Angle zénithal de visée ( $\theta_{vmin}$ ; $\theta_{vmax}$ )	Angle azimutal de visée ( $\phi_{vmin}$ ; $\phi_{vmax}$ )	Heure d'acquisition (hh : mm) GMT
9 juillet 1998	29.5° ; 52.5°	132.0° ; 186.0°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 285.0°	17 : 41
16 juillet 1998	30.5° ; 54.0°	136.5° ; 190.5°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 306.0°	18 : 48
23 juillet 1998	30.5° ; 55.0°	133.5° ; 186.0°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 297.0°	18 : 13
24 juillet 1998	31.5° ; 55.5°	133.5° ; 180.0°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 292.5°	17 : 53
3 août 1998	33.5° ; 57.5°	135.0° ; 181.5°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 294.0°	18 : 01
4 août 1998	34.5° ; 58.0°	135.0° ; 175.5°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 285.0°	17 : 42
5 août 1998	36.0° ; 52.5°	135.0° ; 169.5°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 118.5°	17 : 22
17 août 1998	37.5° ; 61.5°	138.0° ; 192.0°	1.0° ; 60.5°	87.0° ; 303.0°	18 : 32

Bien que l'on considère qu'une mesure est représentative des conditions atmosphériques dans un rayon d'environ 50 km, la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride est prise sur l'image entière. Cependant, dans les manipulations suivantes, les sous-images des sites étudiés ont une superficie de 100 par 100 pixels et sont centrées autour des stations au sol.

La figure 34 montre un exemple de régression appliquée sur une sous-image du 17 août 1998 au-dessus du site de Thompson. Il est important de rappeler que la droite des sols nus est obtenue en comparant les réflectances apparentes dans l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et le proche infrarouge. Les pixels de sols sont caractérisés par une réflectance plus élevée dans la bande de l'infrarouge de courtes longueurs d'onde et du moyen infrarouge que dans la bande proche infrarouge. Lorsqu'un pixel est sélectionné comme étant un sol nu, les réflectances dans les bandes bleue et rouge (pour former le canal hybride) et proche infrarouge sont extraites. Ces réflectances permettent de faire le calcul de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride tel que l'équation 29 décrite précédemment soit satisfaite:

$$\rho_{PIR}^* = a_{PIR/RB} \rho_{RB}^* + b_{PIR/RB} \quad (29)$$

Où  $a_{PIR/RB}$  et  $b_{PIR/RB}$  sont la pente et l'ordonnée à l'origine dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride.



**Figure 34 :** Exemple de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride ( $\gamma = 1.0$ ), le 17 août 1998 sur le site de Thompson



La droite des sols nus pour chacune des images satellitaires est résumée au tableau 22. Celles-ci sont calculées sur l'image entière et non sur une sous-image au-dessus des sites d'étude.

**Tableau 22** : Droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride ( $\gamma = 1.0$ ), sites Thompson et Waskesiu, Canada

Date d'acquisition	Droite des sols nus	Coefficient de régression $R^2$
	$\rho_{PIR}^* = a_{PIR/RB} \times \rho_{RB}^* + b_{PIR/RB}$	
9 juillet 1998	$0.7210 \rho_{RB}^* + 0.1558$	0.605
16 juillet 1998	$0.6947 \rho_{RB}^* + 0.1319$	0.4981
23 juillet 1998	$0.7932 \rho_{RB}^* + 0.1337$	0.5906
24 juillet 1998	$0.8195 \rho_{RB}^* + 0.1359$	0.6201
3 août 1998	$0.7472 \rho_{RB}^* + 0.1404$	0.6684
4 août 1998	$0.8396 \rho_{RB}^* + 0.1429$	0.6321
5 août 1998	$0.7486 \rho_{RB}^* + 0.1680$	0.7823
17 août 1998	$0.8561 \rho_{RB}^* + 0.1308$	0.7913

La pente de la droite des sols nus, obtenue selon les images satellitaires, devrait être affinée. En effet, la pente obtenue théoriquement est plus faible que celle obtenue à partir des images satellitaires (voir tableau 4 où  $\rho_{PIR}^* = 0.5243 \rho_{RB}^* + 0.1163$  avec  $R^2 = 0.7951$  pour  $\gamma = 1.0$ ). Cette augmentation de la valeur de la pente entraîne peut être une certaine erreur dans le calcul des indices de végétation et donc dans l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols sur les images satellitaires. Deux possibilités peuvent être vérifiées afin d'obtenir une droite des sols nus semblable à celle calculée théoriquement. La première façon consiste à prendre des pixels de sols nus seulement. Il s'agit donc d'optimiser l'algorithme de calcul de la droite des sols nus afin d'imposer plus de restrictions à la sélection de pixels de sols nus. La deuxième façon consiste à prendre la limite inférieure du graphique. Dans ce cas, la pente diminuerait pour tendre vers les valeurs obtenues théoriquement. Une étude plus approfondie de l'effet de la pente des sols nus sur l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols devrait être apportée dans un travail futur.

## 8.1 Comparaison des différents modèles d'extraction

L'extraction de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm est effectuée en fonction de différentes restrictions sur la sélection des pixels. Une valeur de NDVI minimale (0.01, 0.2 et 0.6 pour le modèle ATIM; 0.3 et 0.5 pour le modèle DDV) doit être obtenue afin que le pixel soit sélectionné pour le calcul de l'épaisseur optique des aérosols. Cette sélection élimine les pixels de sols très clairs pouvant influencer l'estimation du résultat. Les valeurs d'épaisseur optique des aérosols, servant à la comparaison avec les valeurs simulées, sont celles fournies (mesurées et ramenées à 550nm) par les photomètres solaires AEROCAN (avec les valeurs filtrées des nuages lorsque ces données étaient disponibles) sur les sites de Thompson et de Waskesiu. Le tableau 23 illustre les valeurs mesurées de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm.

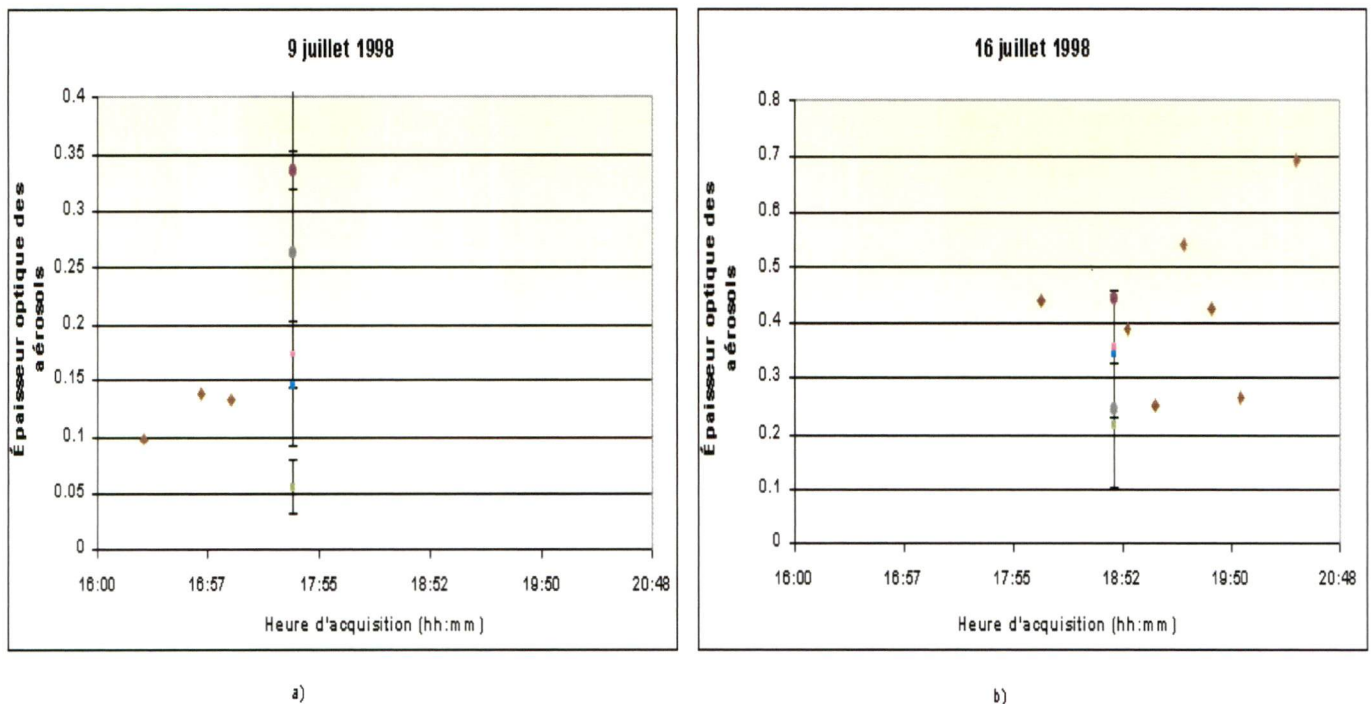
**Tableau 23** : Valeurs mesurées de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm et de la concentration en eau pour les sites Waskesiu et Thompson, Canada

Date d'acquisition	[eau] Waskesiu (g / cm <sup>2</sup> )	Épaisseur optique Waskesiu (550nm)	[eau] Thompson (g / cm <sup>2</sup> )	Épaisseur optique Thompson (550nm)
9 juillet 1998	3.5	0.134	1.87	0.142
16 juillet 1998	2.37	0.389 et 0.441	1.69	0.252 et 0.289
23 juillet 1998	1.98	0.113	1.51	0.111
24 juillet 1998	2.34	0.115	2.05	0.054
3 août 1998	2.62	0.166	3.12 et 0.08	0.242 et 0.295
4 août 1998	2.52	0.141	3.28	0.799
5 août 1998	2.35	0.074	2.58	0.175
17 août 1998	2.5	0.141 et 0.082	1.53	0.133

Il est à noter que certaines journées comportent plus d'une valeur puisque l'heure à laquelle l'image a été acquise au capteur et celle à laquelle l'épaisseur optique a été mesurée au sol par les photomètres se situait entre deux valeurs.

Pour des raisons pratiques, une sous image de 100 par 100 pixels est extraite des données brutes au-dessus des sites d'étude. L'épaisseur optique des aérosols est celle provenant de la moyenne des valeurs de l'épaisseur optique des aérosols obtenue pour chaque pixel de la sous image. L'image ne reflète donc pas réellement l'endroit où se trouve les photomètres sur les sites d'étude mais représente plutôt une moyenne sur cette région. La figure 35 présente la variation de l'épaisseur optique mesurée au sol et ramenée à 550nm et de celle extraite pour différentes restrictions en fonction de l'heure d'acquisition par AEROCAN sur le site de Waskesiu, pour chaque dates d'acquisition.

**Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM et modèle DDV) en fonction de l'heure d'acquisition, site Waskesiu**

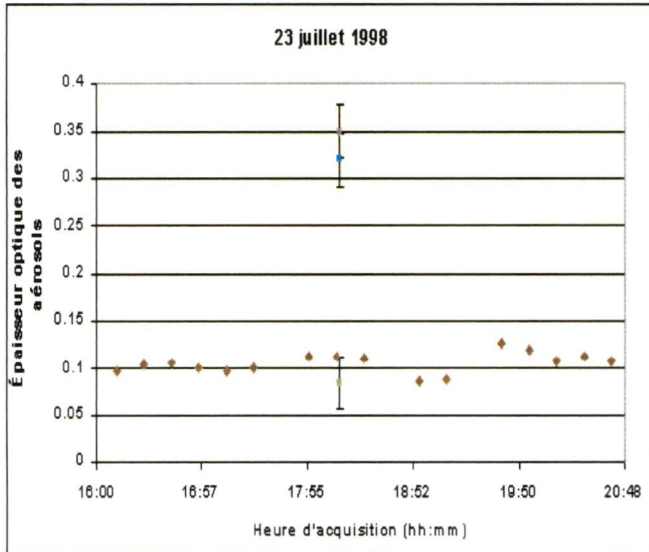


**Légende**

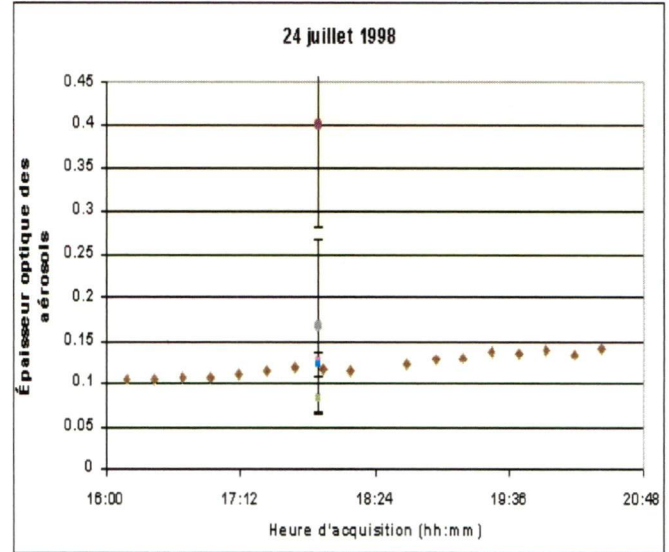
- ◆ Épaisseur optique des aérosols (550nm) mesurée
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.01)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.2)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.6)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.3)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.5)



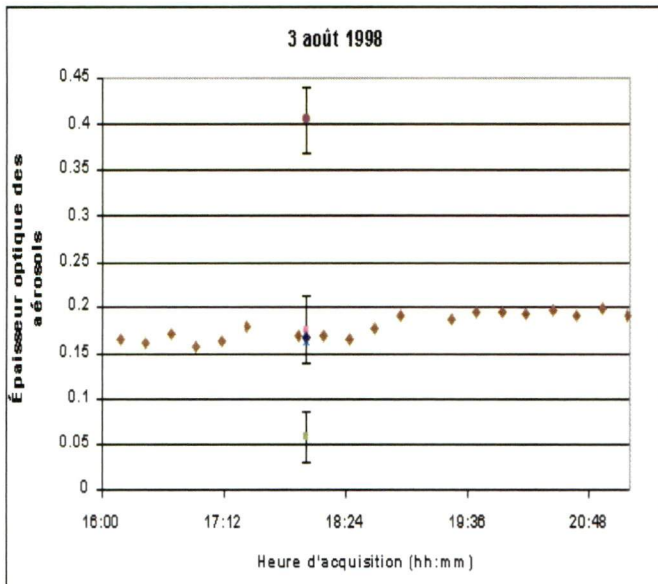
**Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM et modèle DDV) en fonction de l'heure d'acquisition, site Waskesiu**



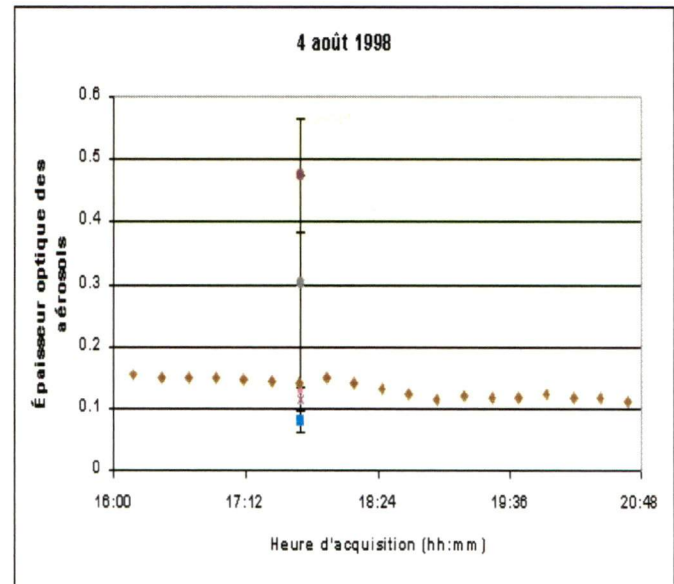
c)



d)



e)

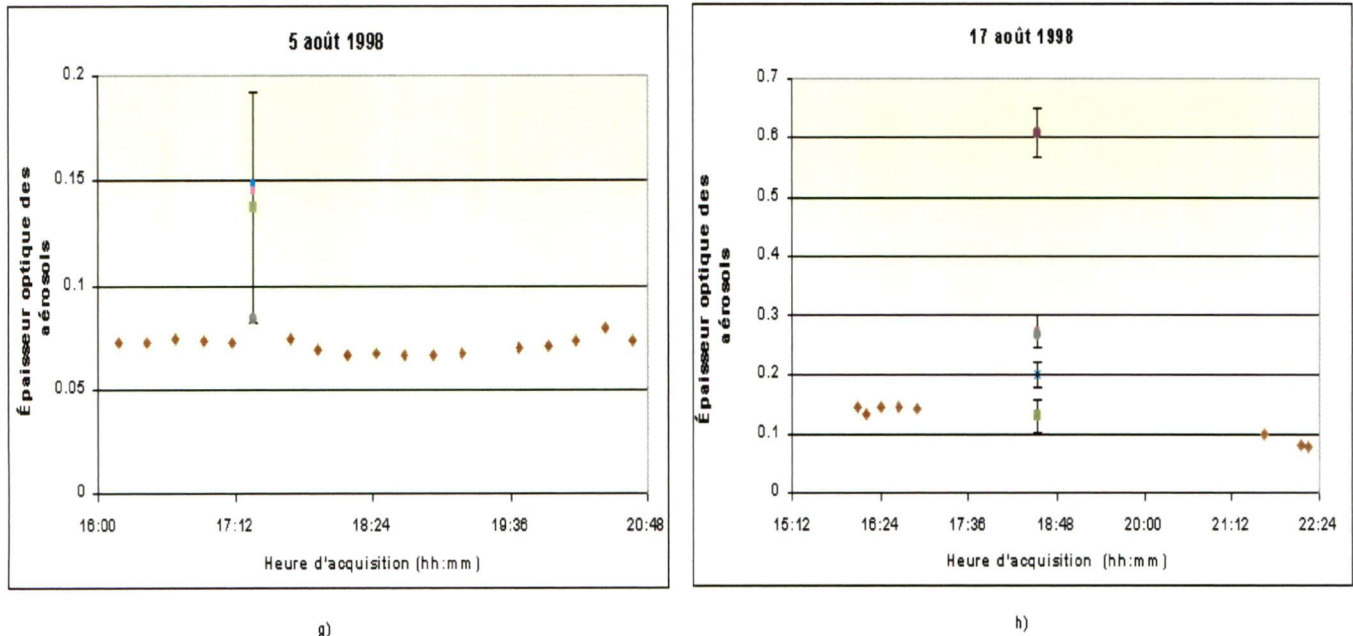


f)

**Légende**

- ◆ Épaisseur optique des aérosols (550nm) mesurée
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.01)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.2)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.6)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.3)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.5)

**Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM et modèle DDV) en fonction de l'heure d'acquisition, site Waskesiu**



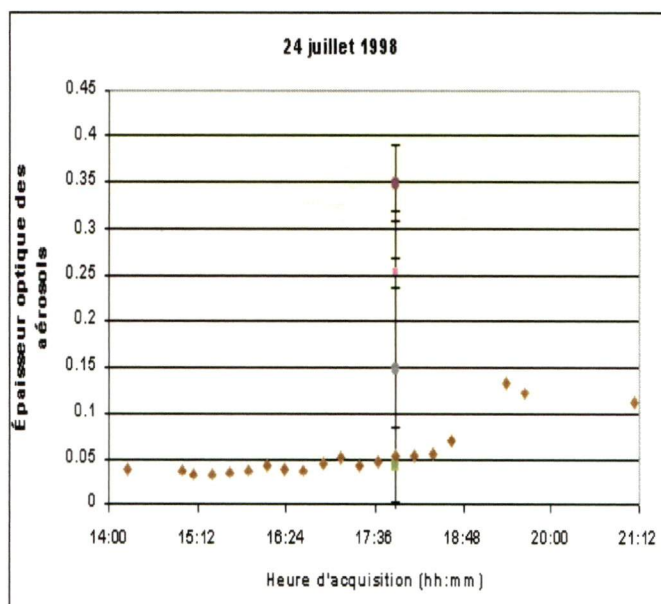
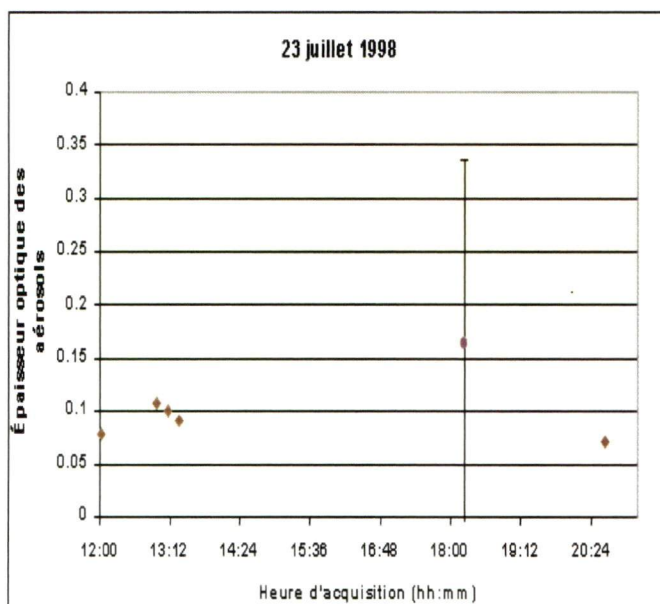
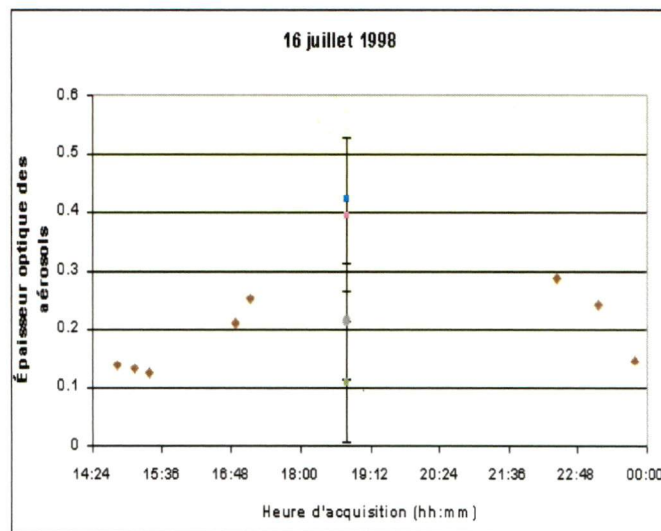
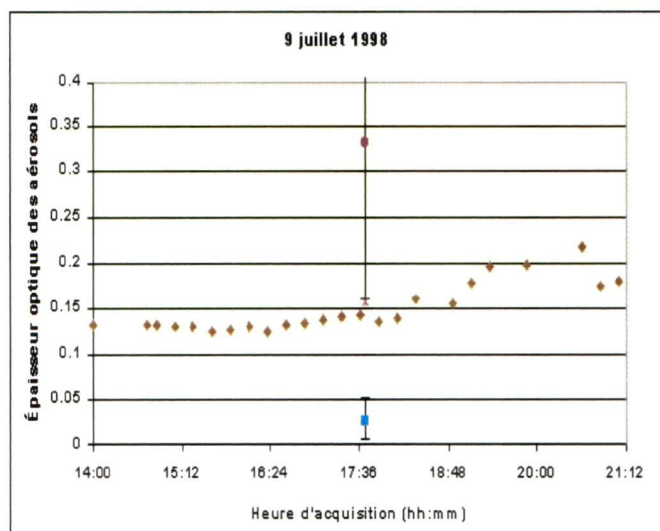
**Légende**

- ◆ Épaisseur optique des aérosols (550nm) mesurée
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.2)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.3)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.6)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.5)

**Figure 35 :** Épaisseur optique des aérosols à 550nm en fonction de l'heure d'acquisition site de Waskesiu  
a) 26/07/98 b) 16/07/98 c) 23/07/98 d) 24/07/98 e) 03/08/98 f) 04/08/98 g) 05/08/98 h) 17/08/98

La figure 36 présente la variation de l'épaisseur optique mesurée au sol et ramenée à 550nm et de celle extraite pour différentes restrictions en fonction de l'heure d'acquisition par AEROCAN sur le site de Thomspson, pour chaque date d'acquisition. Les figures 37 a) et b) illustrent l'épaisseur optique des aérosols à 550nm, obtenue par les modèles ATIM et DDV, en fonction de l'épaisseur optique des aérosols mesurée simultanément à partir du sol. Le tableau 24 montre l'erreur quadratique moyenne obtenue pour chacune des applications.

**Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM et modèle DDV) en fonction de l'heure d'acquisition, site Thompson**

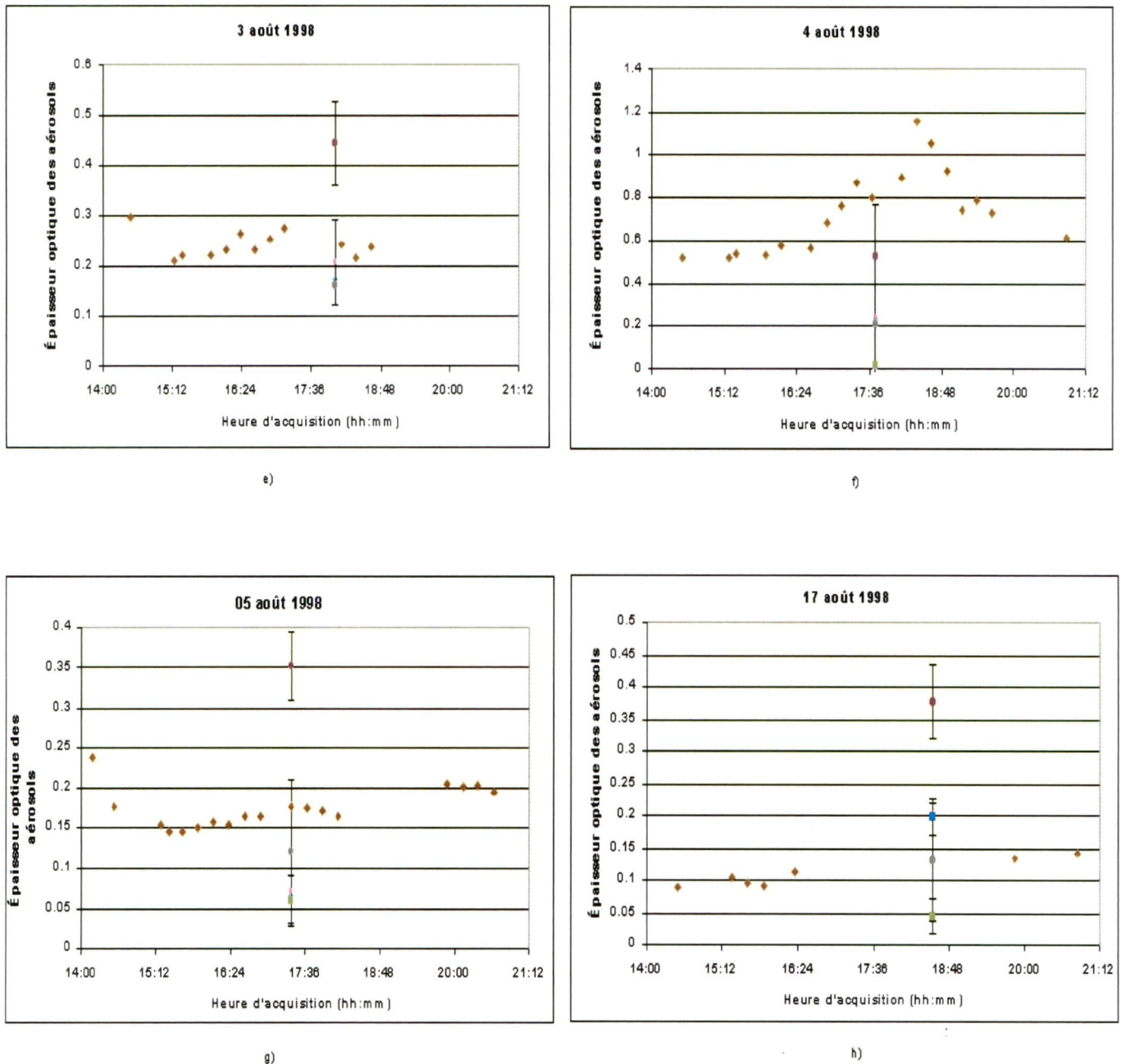


**Légende**

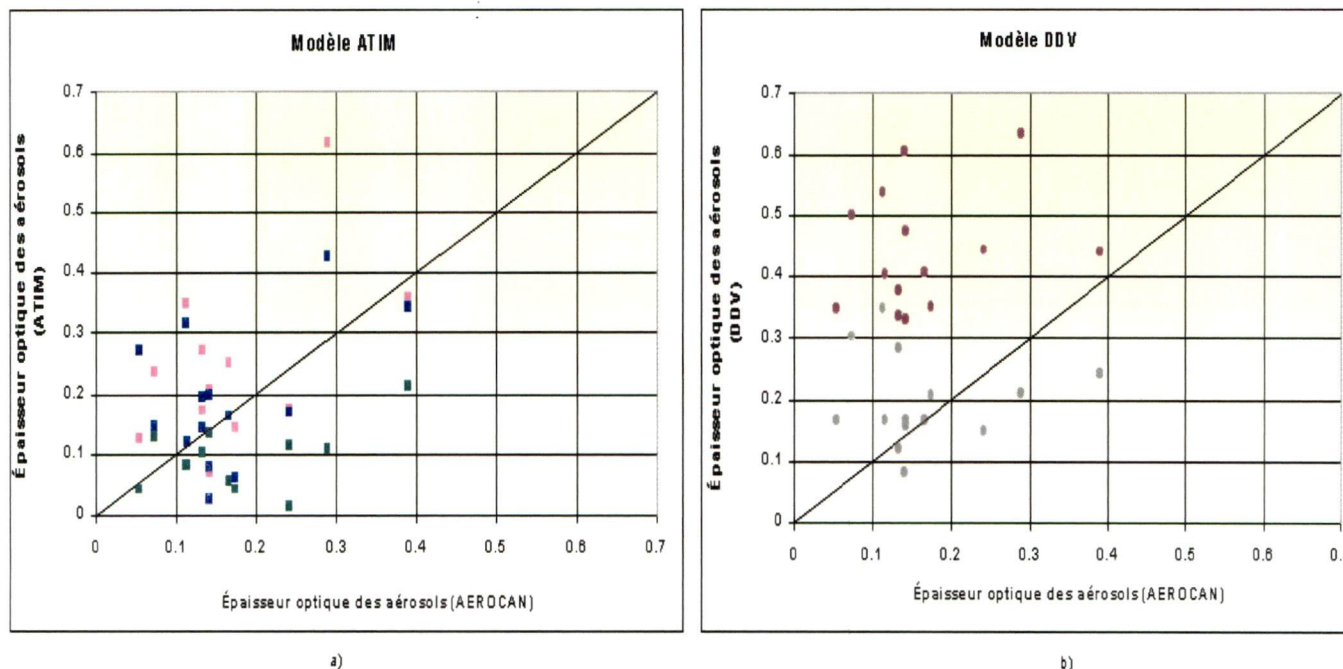
- ◆ Épaisseur optique des aérosols (550nm) mesurée
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.2)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.3)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.6)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.5)



**Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM et modèle DDV) en fonction de l'heure d'acquisition, site Thompson**



**Épaisseur optique des aérosols simulée (Modèles ATIM et DDV) en fonction de l'épaisseur optique des aérosols mesurée (AÉROCAN) pour différentes restrictions sur la sélection des pixels**



**Légende**

- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.01)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.2)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) ATIM(NDVI > 0.6)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.3)
- Épaisseur optique des aérosols (550nm) DDV(NDVI > 0.5)

**Figure 37 :** Épaisseur optique des aérosols obtenue du modèle d'extraction en fonction de la valeur mesurée  
a) modèle ATIM b) modèle DDV

La comparaison, d'après les figures 35, 36 et 37, des valeurs mesurées et des valeurs calculées avec le modèle ATIM montre qu'il y a une plus grande corrélation à partir d'un NDVI > 0.2 et ce, avec une erreur quadratique moyenne de  $\Delta\bar{\delta} = 0.0721$ . Le modèle DDV présente une plus grande corrélation entre les valeurs mesurées et calculées à partir d'un NDVI > 0.5 et ce, avec une erreur quadratique moyenne de  $\Delta\bar{\delta} = 0.0743$ .

Le modèle ATIM tend à surestimer l'épaisseur optique lorsque NDVI > 0.01, ce qui signifie que ce modèle demeure sensible au type de couvert. Des pixels de sols nus sont alors sélectionnés et la brillance de ceux-ci peut faire en sorte de modifier la valeur de l'épaisseur optique des aérosols (tel que démontré dans les simulations théoriques). Pour NDVI > 0.6, le modèle ATIM sous-estime l'épaisseur optique des aérosols, particulièrement lorsque celle-ci est élevée. L'effet de

l'atmosphère est plus perceptible lorsque le couvert végétal est dense. Le modèle ATIM tend vers les valeurs mesurées d'épaisseur optique des aérosols lorsque  $NDVI > 0.2$ . Cependant, il ne faut pas oublier que les résultats représentent une moyenne sur une région de 100 par 100 pixels.

Le modèle DDV surestime l'épaisseur optique lorsque  $NDVI > 0.3$ . Des pixels de couvert végétal incomplet sont alors sélectionnés. Comme les simulations théoriques permettent de le constater, ce modèle devrait être efficace à partir d'un  $NDVI > 0.65$ . D'après la figure 37 b), lorsque le  $NDVI > 0.5$  (tel qu'employé dans l'application précédente), le modèle DDV tend alors vers l'épaisseur optique des aérosols mesurée.

**Tableau 24** : Erreur quadratique moyenne de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm pour différentes restrictions, sites Wakesiu et Thompson

Erreur quadratique moyenne de l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm				
ATIM			DDV	
NDVI > 0.01	NDVI > 0.2	NDVI > 0.6	NDVI > 0.3	NDVI > 0.5
0.0836	0.0721	0.1160	0.1884	0.0743

La corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs obtenues des modèles d'extraction DDV et ATIM est tout de même faible. La validation empiriques est peu concluante contrairement à la validation théorique. Néanmoins, il semble que le modèle ATIM soit légèrement préférable au modèle DDV à partir d'un  $NDVI > 0.2$  donc lorsque le couvert est moyennement dense.

Des facteurs peuvent amener des erreurs dans l'estimation de l'épaisseur optique des aérosols. Certaines considérations doivent donc être prises :

- Dans cette étude, la droite des sols nus est unique pour l'image entière au lieu d'être considérée pour chacune des sous-images. Les paramètres de la droite des sols nus sont alors donc constants sur toute l'image Ceux-ci pourraient cependant être variables en fonction du type de sol et d'atmosphère (parce que la droite des sols nus est calculée à partir des réflectances apparentes, donc elle reste sensible à l'atmosphère).

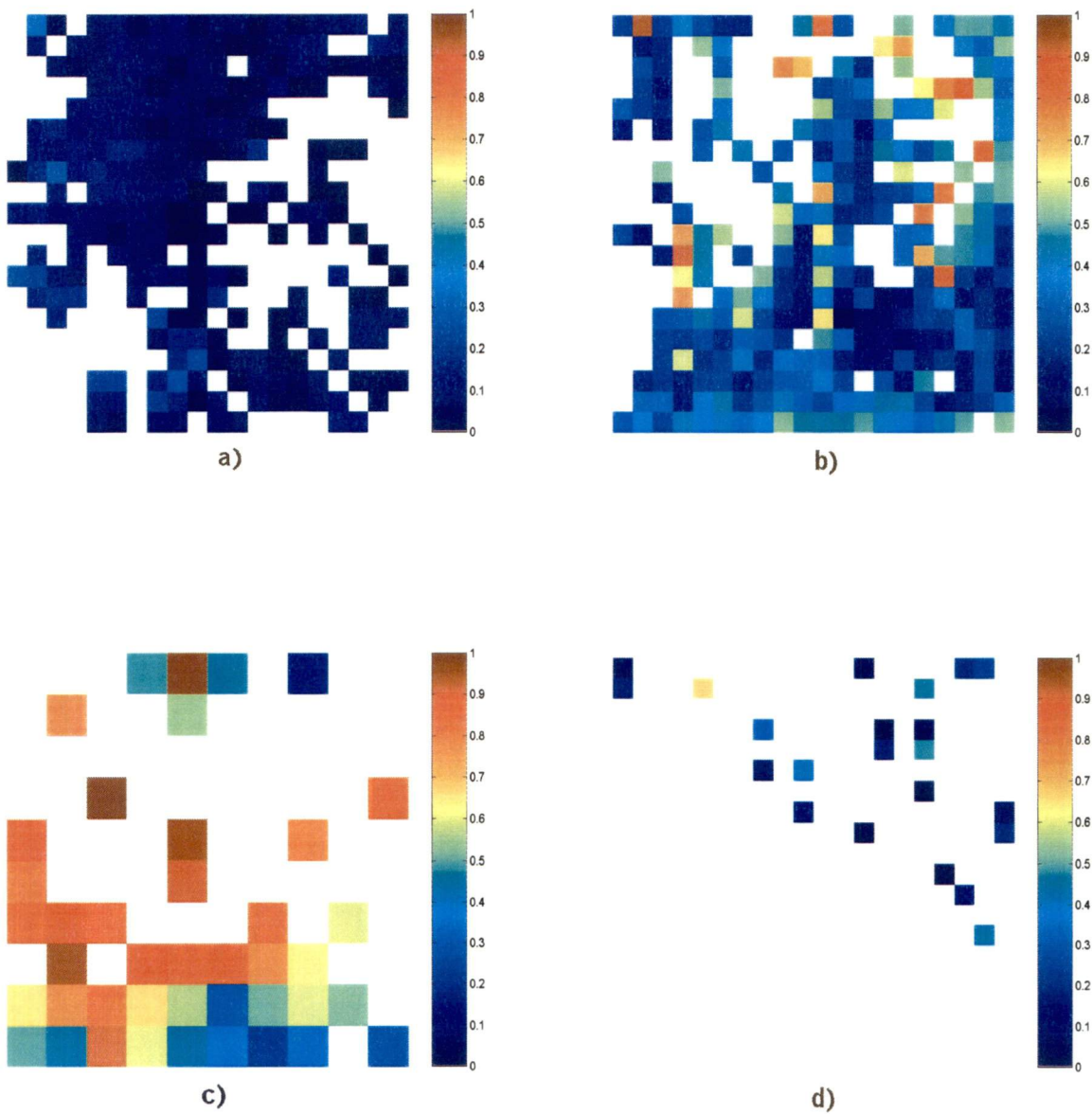


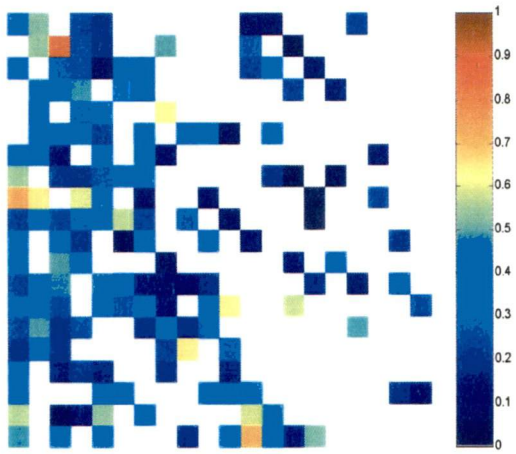
- Dans le même ordre d'idée, la droite des sols nus varie, d'après les simulations, selon le type d'aérosols et selon les angles de visée, il serait donc intéressant d'approfondir la sensibilité de l'inversion de l'épaisseur optique des aérosols aux variations de la droite des sols nus.
- La détermination de la droite des sols nus (sélection des pixels sans végétation seulement) devrait être affinée afin d'avoir une équation plus près de la droite théorique.
- Le facteur d'ajustement (fixé à  $\gamma = 1.0$  dans notre cas) qui sert à calculer le canal hybride pourrait être variable d'un endroit à l'autre.
- Certains effets directionnels du couvert peuvent influencer la détermination de l'épaisseur optique des aérosols (tel que présenté dans la section 6.4) puisque la surface n'est peut être pas Lambertienne.
- La nature des aérosols peut entraîner une dépendance spectrale de l'épaisseur optique des aérosols. Les paramètres qui constituent le type d'atmosphère peuvent donc varier.
- Ajuster le modèle ATIM afin de réduire l'effet des angles de visée.
- Vérifier l'effet de l'étalonnage du capteur sur le modèle d'extraction.

Les figures 38 et 39 représentent la cartographie de l'épaisseur optique des aérosols (à 550nm) obtenue avec les modèles d'extraction  $DDV_{NDVI > 0.3}$  et  $ATIM_{NDVI > 0.2}$  pour les sites Waskesiu et Thompson. Les faibles valeurs d'épaisseur optique des aérosols correspondent au bleu ( $\delta_{550nm} \rightarrow 0.0$ ), alors que les fortes valeurs d'épaisseur optique des aérosols correspondent au rouge ( $\delta_{550nm} \rightarrow 1.0$ ). Les endroits n'ayant pas de couleur correspondent aux pixels où le modèle n'a pu extraire de valeur d'épaisseur optique. On retrouve ces pixels sans couleur soit parce qu'il y avait présence de nuages ou simplement parce que la valeur d'épaisseur optique des aérosols simulée par le modèle d'extraction est supérieure à 1.0 (valeur limite d'épaisseur optique des aérosols imposée au modèle). Par ailleurs, la résolution spatiale de la cartographie n'est pas la même d'un modèle à l'autre parce que le pas d'itération employé est différent. En effet, le modèle DDV utilise le code CAM5S qui est beaucoup plus lent d'exécution que le code SMAC employé dans le modèle ATIM. Le pas d'itération du modèle DDV a donc été augmenté afin de calculer l'épaisseur optique sur une moins grande quantité de pixels.

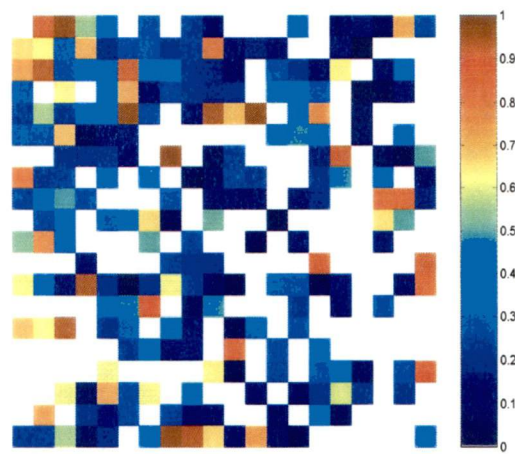
Les annexes 4, 5 et 6 illustrent la cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm pour le modèle  $DDV_{NDVI > 0.5}$  (annexe 4), ainsi que pour les modèles  $ATIM_{NDVI > 0.01}$  (annexe 5) et  $ATIM_{NDVI > 0.6}$  (annexe 6).

**Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm avec le modèle DDV  
pour  $NDVI > 0.3$**

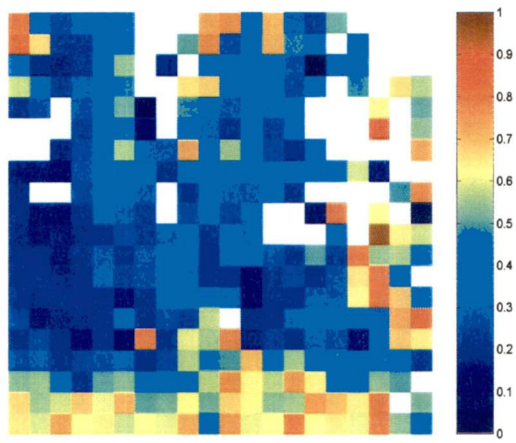




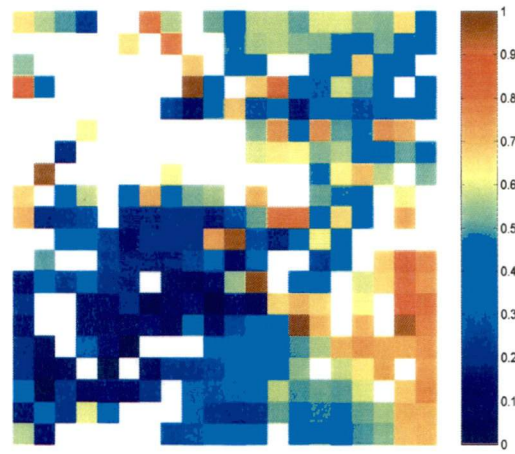
e)



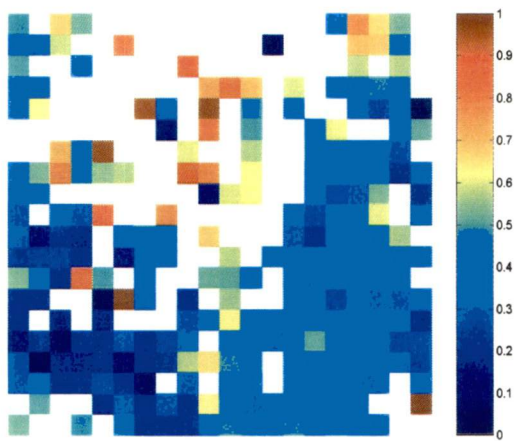
f)



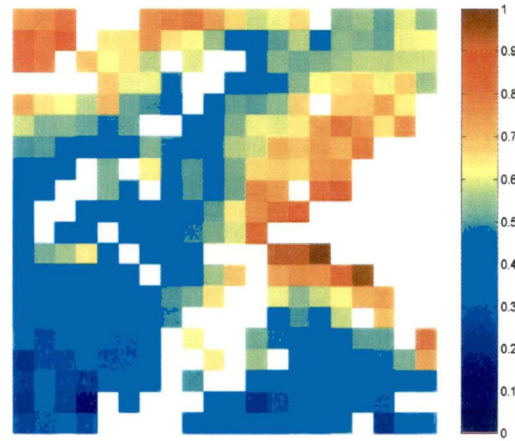
g)



h)

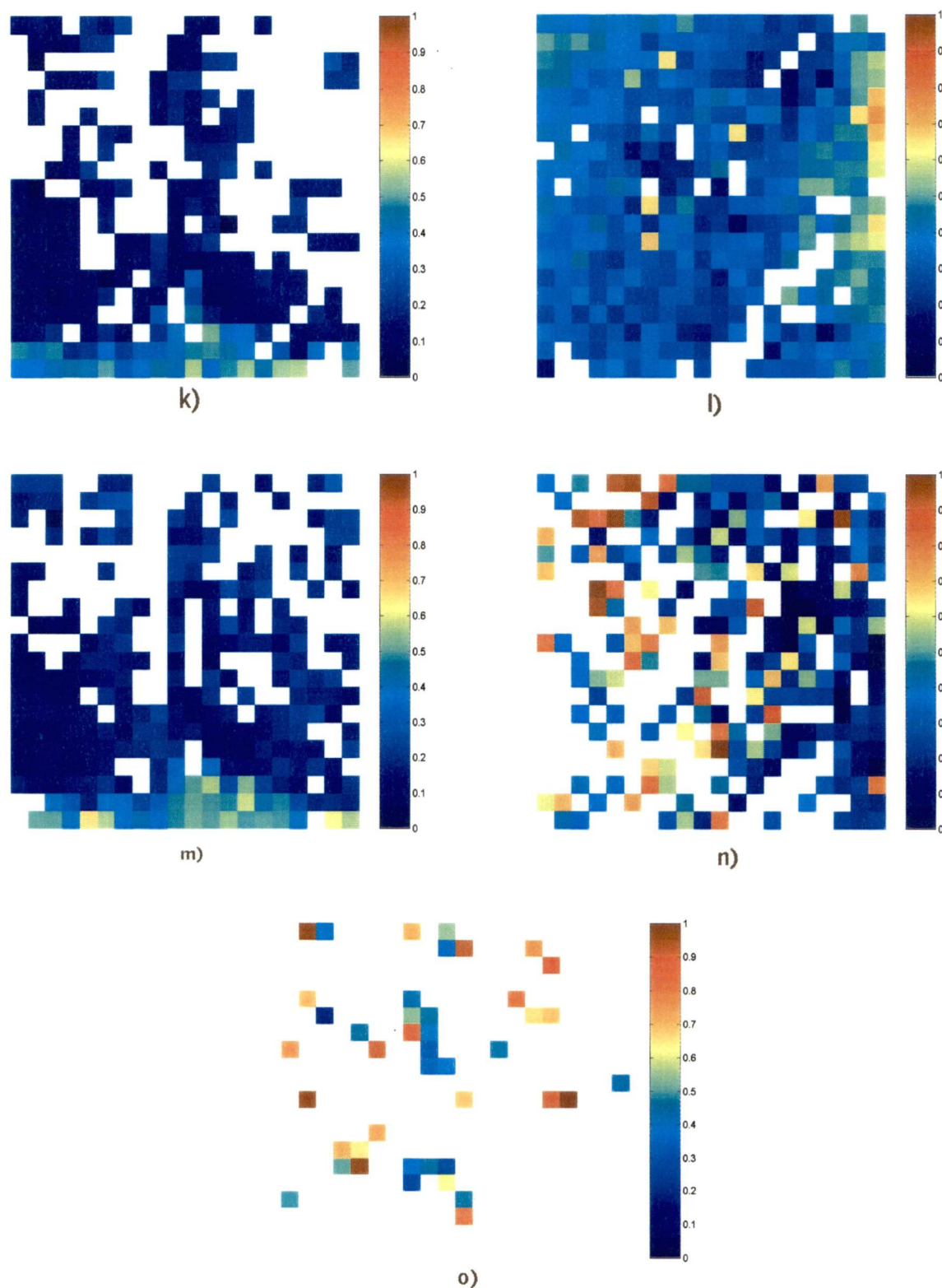


i)



j)



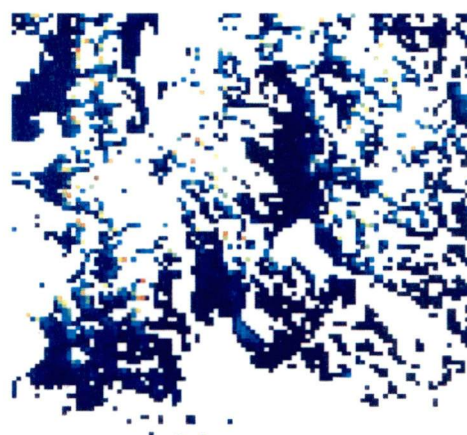


**Figure 38** : Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols avec le modèle d'extraction  $DDV_{NDVI > 0.3}$   
a) Thompson 09/07/98 b) Waskesiu 09/07/98 c) Thompson 16/07/98 d) Waskesiu 16/07/98 e) Waskesiu 23/07/98  
f) Thompson 24/07/98 g) Waskesiu 24/07/98 h) Thompson 03/08/98 i) Waskesiu 03/08/98 j) Thompson 04/08/98  
k) Waskesiu 04/08/98 l) Thompson 05/08/98 m) Waskesiu 05/08/98 n) Thompson 17/08/98 o) Waskesiu 17/08/98

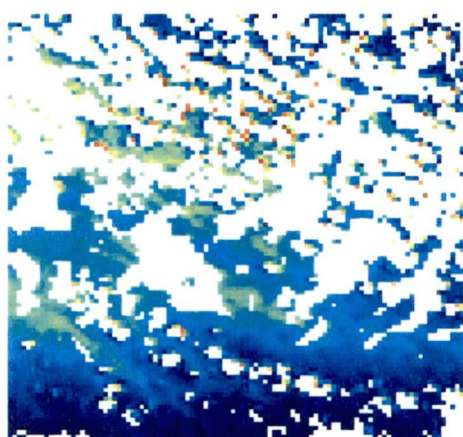
**Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm modèle ATIM  
pour NDVI > 0.2**



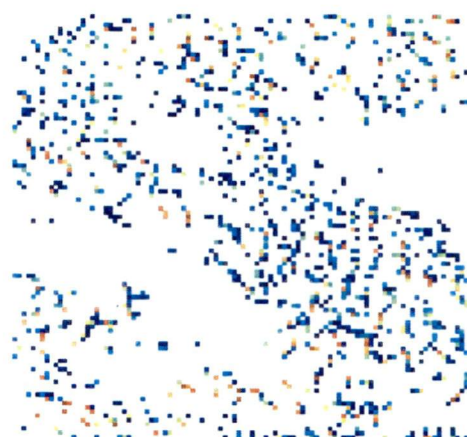
a)



b)



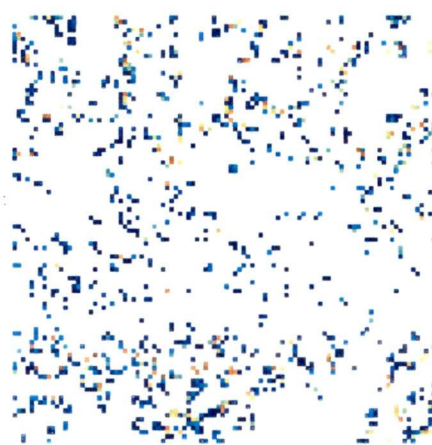
c)



d)



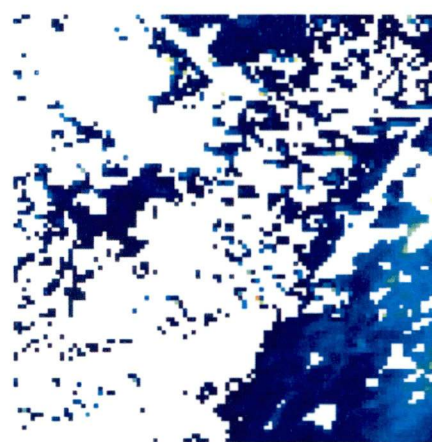
e)



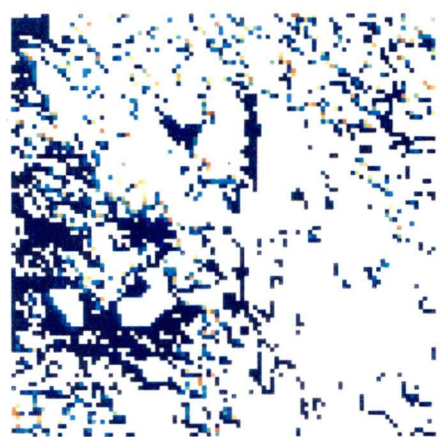
f)



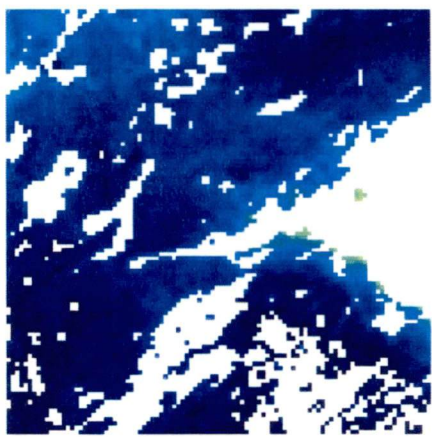
g)



h)

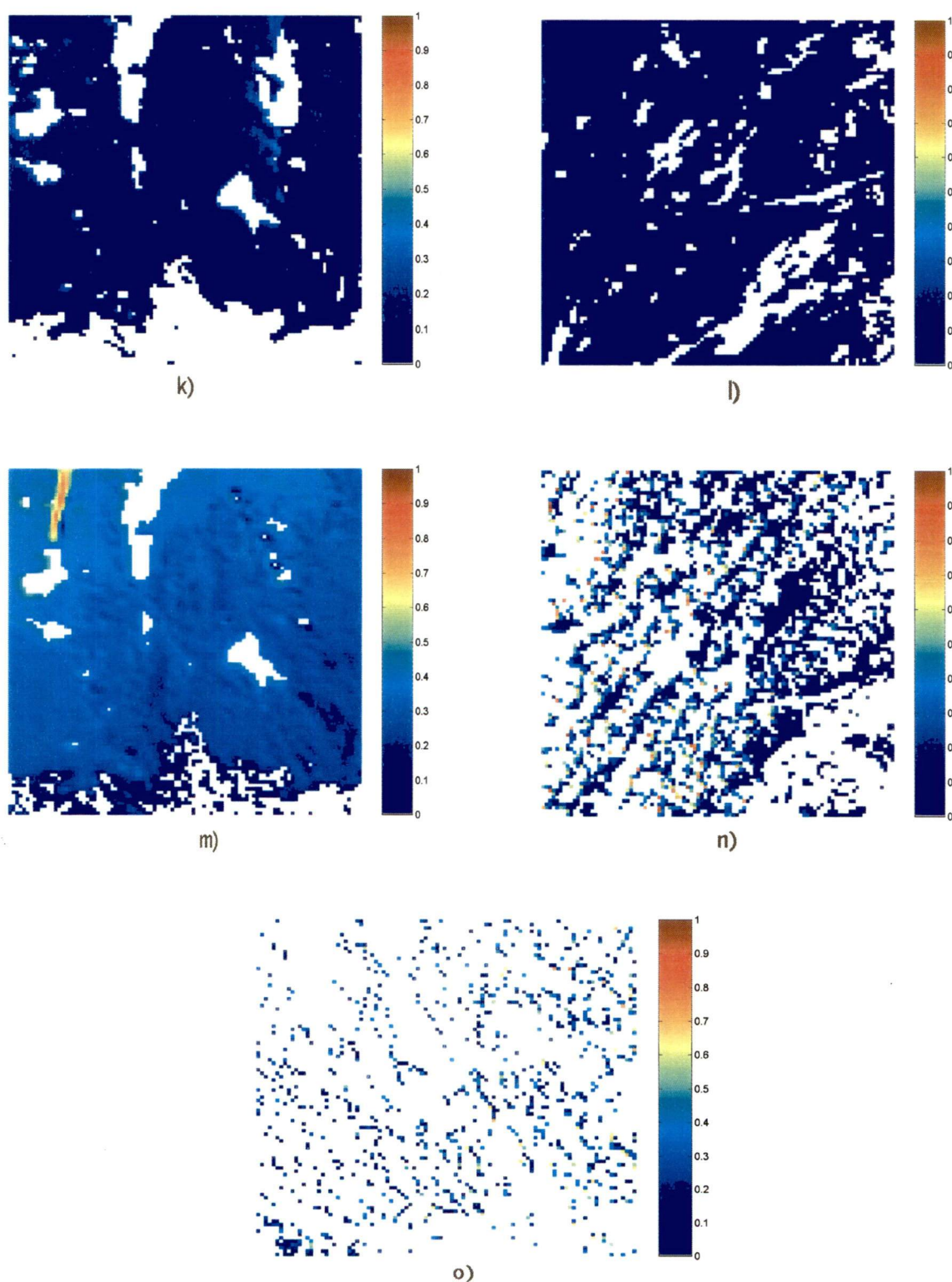


i)



j)





**Figure 39 :** Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols avec le modèle d'extraction  $ATIM_{NDVI > 0.2}$

a) Thompson 09/07/98 b) Waskesiu 09/07/98 c) Thompson 16/07/98 d) Waskesiu 16/07/98  
 e) Waskesiu 23/07/98 f) Thompson 24/07/98 g) Waskesiu 24/07/98 h) Thompson 03/08/98  
 i) Waskesiu 03/08/98 j) Thompson 04/08/98 k) Waskesiu 04/08/98 l) Thompson 05/08/98  
 m) Waskesiu 05/08/98 n) Thompson 17/08/98 o) Waskesiu 17/08/98

## 9. Validation du modèle ATIM

Les feux de forêt influencent l'écosystème de la forêt boréale. Les changements climatiques peuvent modifier la fréquence et l'amplitude des feux de forêt. Le suivi des changements spatiaux et temporels de l'occurrence des feux de forêt est important pour prédire l'impact sur l'environnement (Eastwood *et al.*, 1998). Cette section porte sur la validation de la méthode ATIM. Les résultats du modèle ATIM seront comparés aux images AVHRR afin de connaître l'emplacement de feux de forêt. Ceux-ci sont représentés par une forte concentration en aérosol. Le modèle ATIM sera également appliqué aux images du Burkina Faso (Afrique) afin de vérifier ces limitations sur le type de couvert.

### 9.1 Comparaison du modèle ATIM interpolé avec les images AVHRR

Un modèle d'interpolation est appliqué au modèle d'extraction ATIM afin d'obtenir une cartographie complète de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm. Cependant il est important de spécifier que le modèle d'interpolation ne calcule pas directement l'épaisseur optique des aérosols associée à un pixel mais fait plutôt le calcul moyen en fonction des plus proches voisins. Le modèle interpolé ne correspond pas exactement aux valeurs réelles de l'épaisseur optique des aérosols.

Ainsi, si certains pixels possèdent une valeur élevée d'épaisseur optique des aérosols (de même qu'une valeur très faible) ils influenceront les valeurs interpolées autour de ceux-ci. L'interpolation donne une approximation de ce que pourrait être les variations de l'épaisseur optique des aérosols après l'application du modèle ATIM et ne représente donc pas nécessairement la réalité. Le modèle ATIM a été appliqué et interpolé sur des images de 1000 par 1000 pixels.

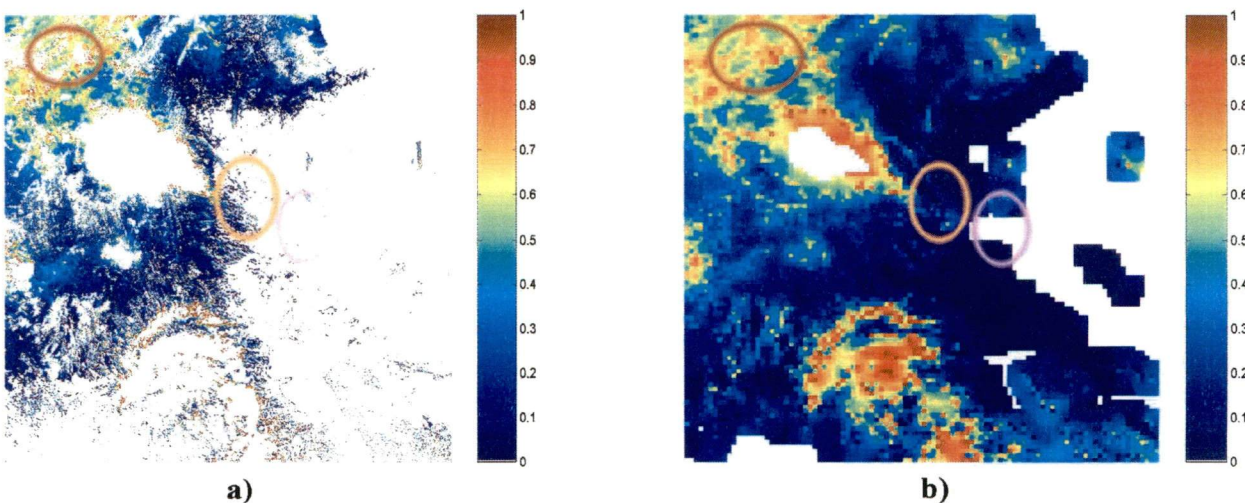


L'apport des images AVHRR (figures 40 à 48) permet de faire la comparaison avec la cartographie extraite à partir du modèles ATIM. Cette comparaison sert à évaluer la présence de feux de forêt (ceux-ci sont notés par des points rouges sur les images AVHRR et sont associés aux images interpolées par le modèle ATIM).

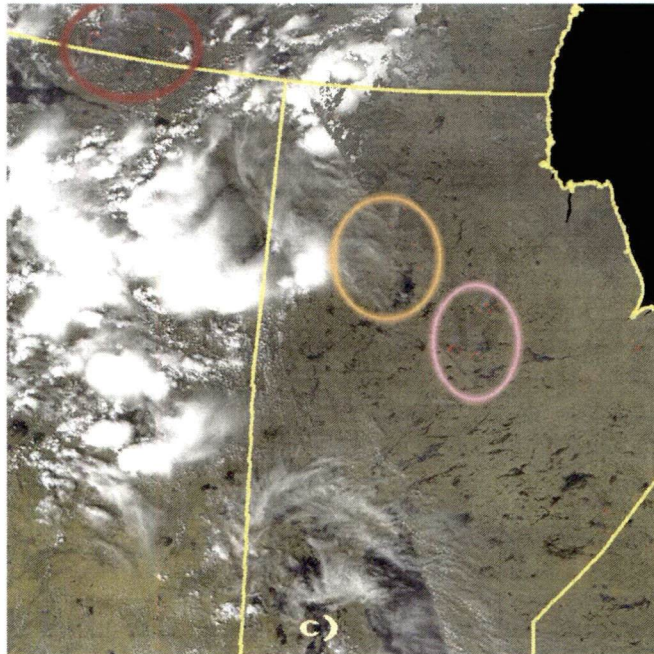
Images du 09/07/98 (figures 40 a), b) et c))

Le modèle ATIM interpolé et non-interpolé tend à surestimer la présence de pixels de nuages ( $0.4 < \delta_{550nm} < 1.0$ ), particulièrement au sud du lac Athabasca. Quelques-uns de ces pixels, situés au nord du lac Athabasca, correspondraient à des feux de forêts selon l'image AVHRR. Une série de feux sur AVHRR est repérable sur l'image interpolée au sud-ouest de la baie d'Hudson et à l'est du lac Indien-sud. Cependant, l'épaisseur optique des aérosols semble être relativement faible sur les images ATIM ( $0.3 < \delta_{550nm} < 0.4$ ), pour signaler la présence de feux de forêt. La forte concentration en épaisseur optique ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.6$ ), à l'ouest des lacs Manitoba et Winnipegosis, est due à des nuages. L'image ATIM sans interpolation ne permet pas de connaître en profondeur l'étendue de l'épaisseur optique des aérosols.

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR (1e 09/07/98)**







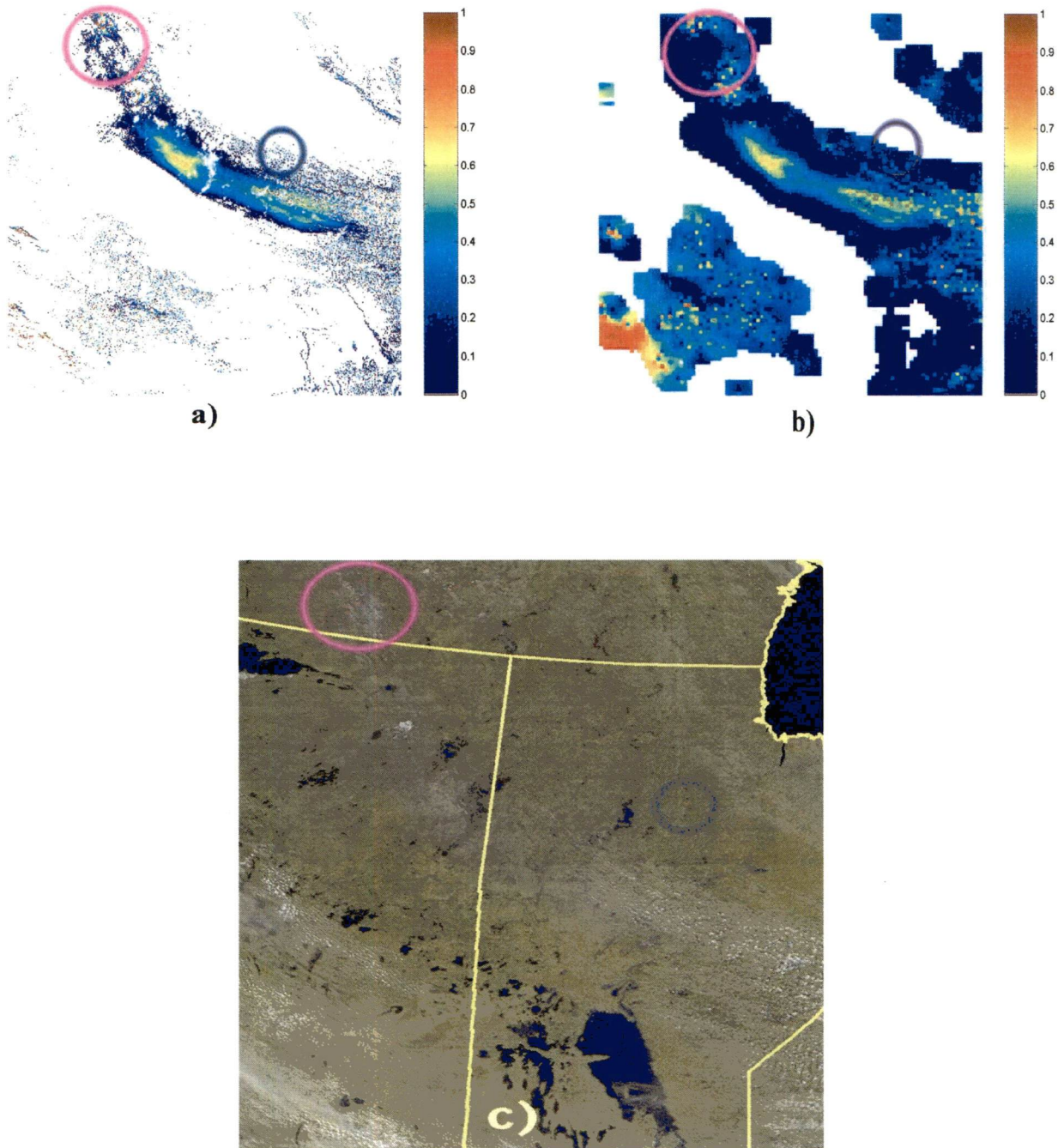
**Figure 40 : 9 juillet 1998**

- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR

Images du 16/07/98 (figures 41 a), b) et c))

D'après la figure de AVHRR, il y a une grande traînée causée par les nuages ou à la fumée qui s'étend du lac Athabasca et se dirige vers la Baie d'Hudson. De même, une série de feux de forêt au nord-est de ce lac est apparente. Selon l'image non-interpolée, cette série de feux est nettement remarquable avec une épaisseur optique des aérosols très élevée ( $0.8 < \delta_{550nm} < 1.0$ ). Cependant, l'interpolation rend les valeurs d'épaisseur optique plus faibles ( $\delta_{550nm} \approx 0.4$ ). Seule la traînée d'épaisseur optique élevée ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.6$ ) est présente. Une forte concentration en épaisseur optique des aérosols ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.9$ ) à l'ouest du lac Manitoba est indiquée sur les images ATIM non-interpolée et interpolée et représente un nuage. Car, d'après l'image AVHRR, il ne semble pas y avoir de feux à cet endroit. Le modèle ATIM a surestimé l'épaisseur optique des aérosols. Cette surestimation peut être due à la présence de nuages ou parce que la couverture du sol à cet endroit influence les indices, ce qui démontre une certaine sensibilité du modèle d'extraction au type de couverture végétale.

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR (le 16/07/98)**



**Figure 41 : 16 juillet 1998**

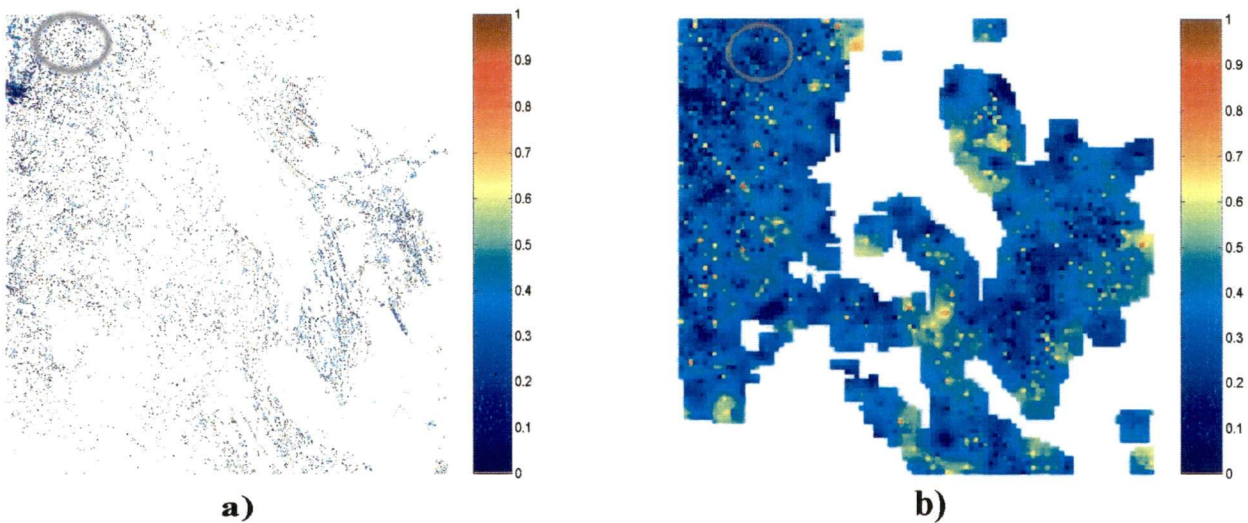
- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR.



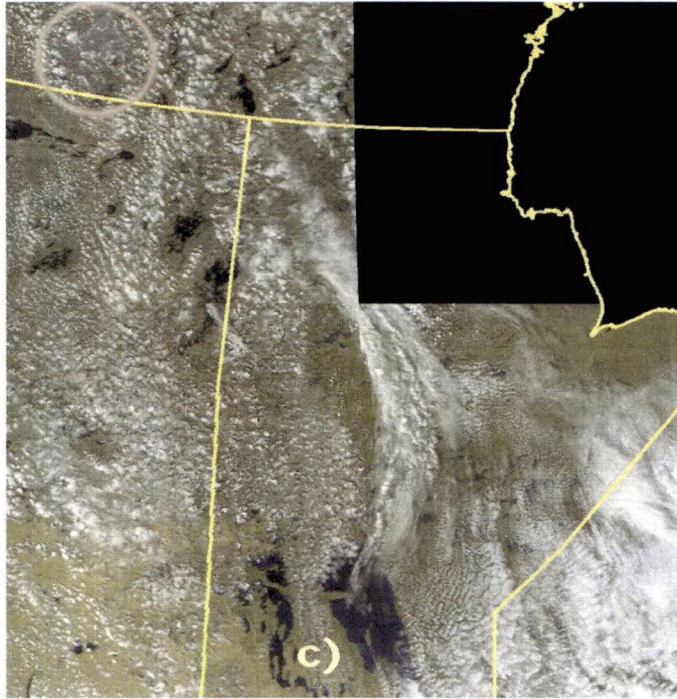
Image du 23/07/98 (figures 42 a), b) et c))

L'image AVHRR présente beaucoup de nuages. La forte concentration en aérosols ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.8$ ), représentée sur l'image ATIM interpolée à l'ouest du lac Manitoba, n'est pas causée par des feux de forêt mais plutôt par la présence de nuages. De même, à l'ouest du lac du Caribou, l'épaisseur optique des aérosols est élevée ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.8$ ) sur l'image ATIM interpolée mais désigne des nuages. Seule la partie au nord du lac Athabasca comporte des feux de forêt ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.5$ ), qui sont confondus avec les pixels de nuages sur l'image ATIM interpolée.

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR (le 23/07/98)**







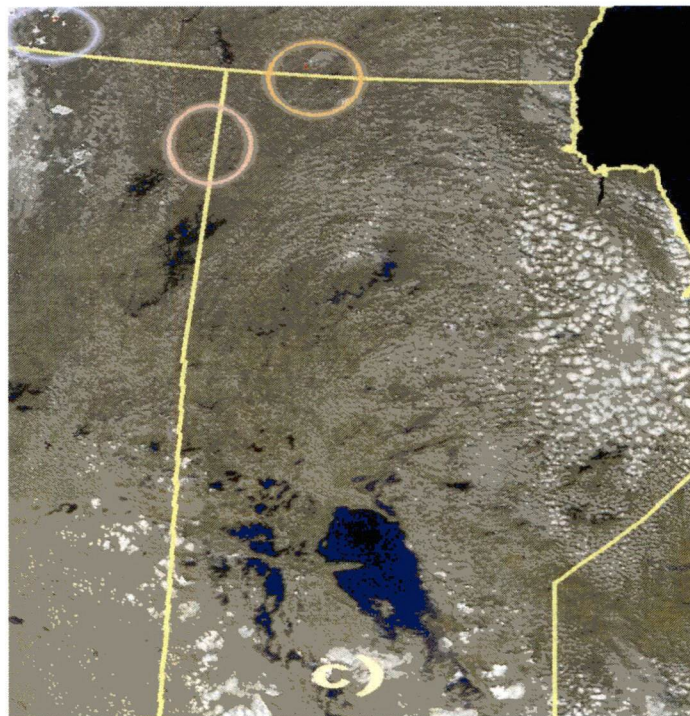
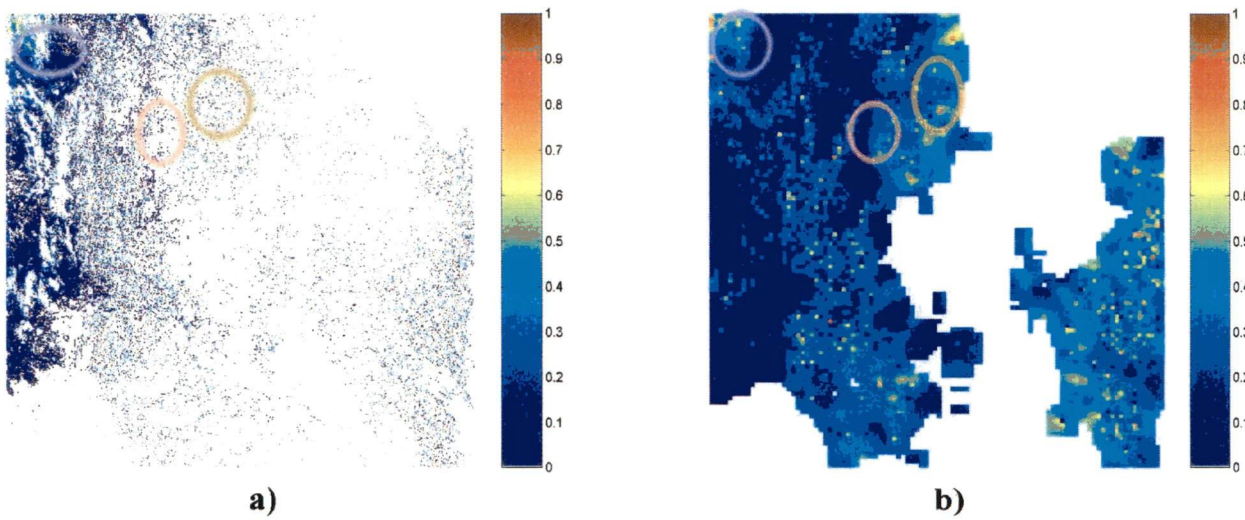
**Figure 42 : 23 juillet 1998**

- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR.

Image du 24/07/98 (figures 43 a), b) et c))

Quelques feux sont présents sur l'image AVHRR au sud du lac Duhawnt mais ils sont en partie confondus avec l'existence de nuages sur l'image ATIM interpolée ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.6$ ). De même, des nuages situés entre les lacs Manitoba et Winnipeg sont représentés par une forte concentration en aérosols sur l'image ATIM interpolée ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.6$ ). Au nord du lac Athabasca de l'image non-interpolée, l'épaisseur optique des aérosols est très élevée ( $0.5 < \delta_{550nm} < 0.9$ ) et indique la présence de feux de forêt. Ceux-ci ne sont toutefois pas présents sur l'image interpolée ( $\delta_{550nm} < 0.2$ ). Finalement, la brillance du sol ou la présence de nuages influence particulièrement le modèle ATIM puisqu'une forte épaisseur optique ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.7$ ) est indiquée à l'ouest du lac Winnipeg alors qu'il n'y a aucun nuage ou feu indiqué à cet endroit.

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé image AVHRR (1e 24/07/98)**



**Figure 43 : 24 juillet 1998**

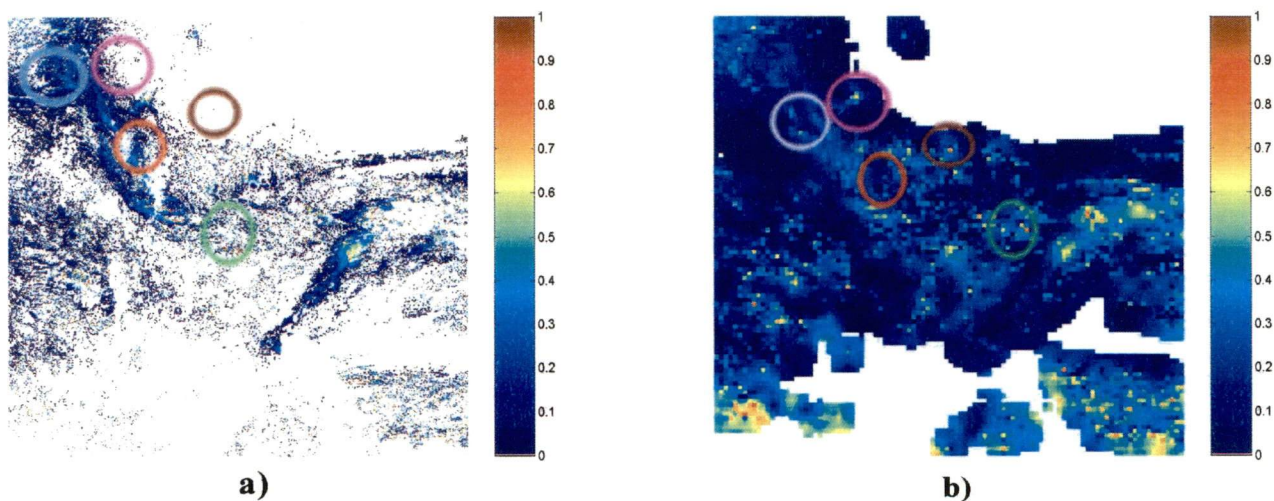
- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR.



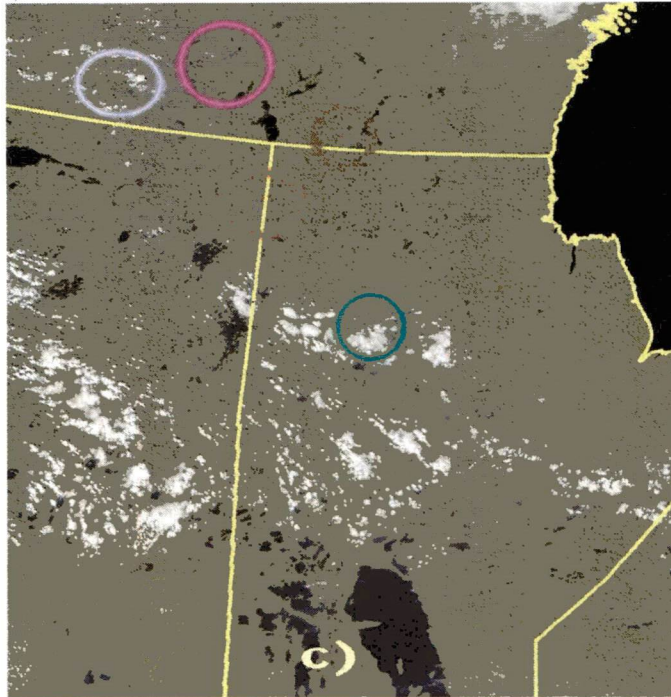
Images du 03/08/98 (figures 44 a), b) et c))

Selon l'image AVHRR, il y a présence de feux de forêt, au nord-est du lac Athabasca et au nord du lac Duhawnt. Ceux-ci sont exprimés sur l'images ATIM non-interpolée par une forte concentration en aérosols ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.8$ ). Sur l'image interpolée, l'épaisseur optique est de plus faible intensité ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.5$ ). Quelques feux sur l'image AVHRR situés à l'est du lac Indien-sud et au nord du lac Caribou, sont indiqués sur les images ATIM non-interpolée et interpolée ( $0.3 < \delta_{550nm} < 0.8$ ). Encore une fois, une forte concentration d'aérosols ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.8$ ), à l'ouest du lac Winnipeg sur l'image ATIM interpolée, indique l'effet de brillance au sol. Le modèle ATIM surestime alors les valeurs d'épaisseur optique des aérosols.

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR (le 03/08/98)**







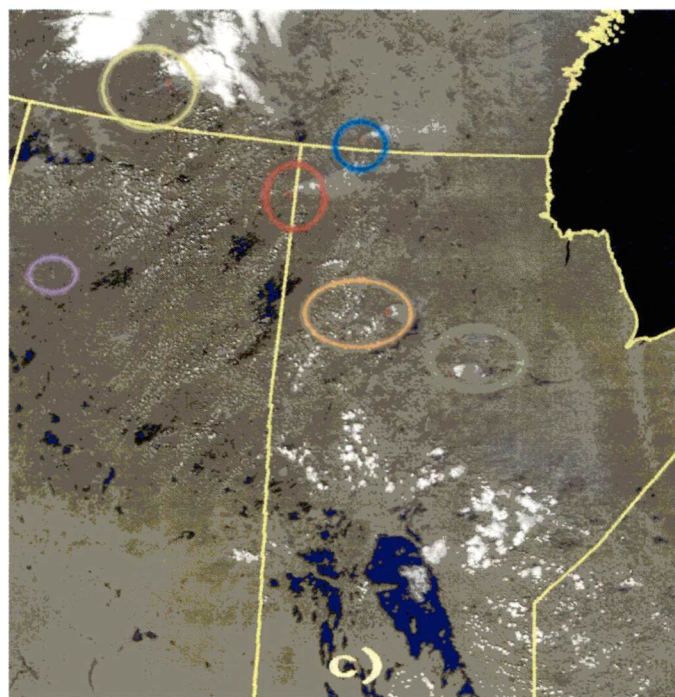
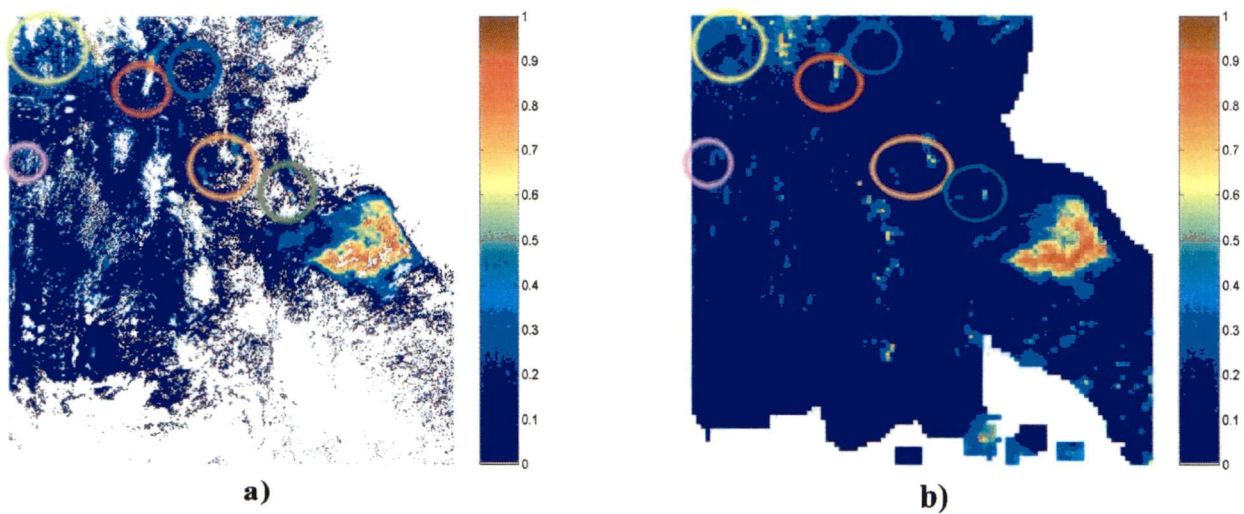
**Figure 44 : 3 août 1998**

- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR

Images du 04/08/98 (figures 45 a), b) et c))

L'image AVHRR compte plusieurs feux de forêt, notamment au nord-est du lac Athabasca. Ceux-ci sont indiqués par une forte épaisseur optique des aérosols ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.9$ ) sur l'image ATIM non-interpolée mais ne sont présentés que par une faible variation de la concentration en aérosols ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.4$ ) sur l'image ATIM interpolée. Au nord et à l'est du lac Indien-sud ainsi qu'au nord du lac Caribou, des feux de forêt et également un panache de fumée sont présents sur l'image AVHRR de même que sur les images ATIM non-interpolée et interpolée ( $0.4 < \delta_{550nm} < 0.9$ ). La très forte concentration en aérosols ( $0.3 < \delta_{550nm} < 0.9$ ) au-dessus de la baie d'Hudson et à l'est du lac Indien-sud est causée par un nuage. L'interpolation réduit l'épaisseur optique des aérosols à ces endroits ( $0.2 < \delta_{550nm} < 0.6$ ).

Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR (1e 04/08/98)



**Figure 45 :** 4 août 1998

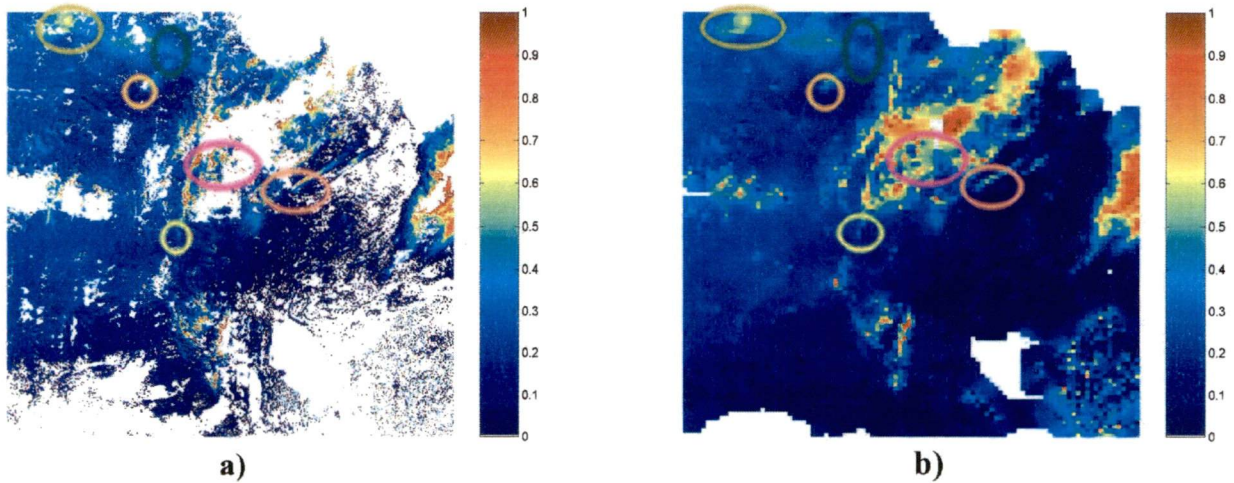
- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR.



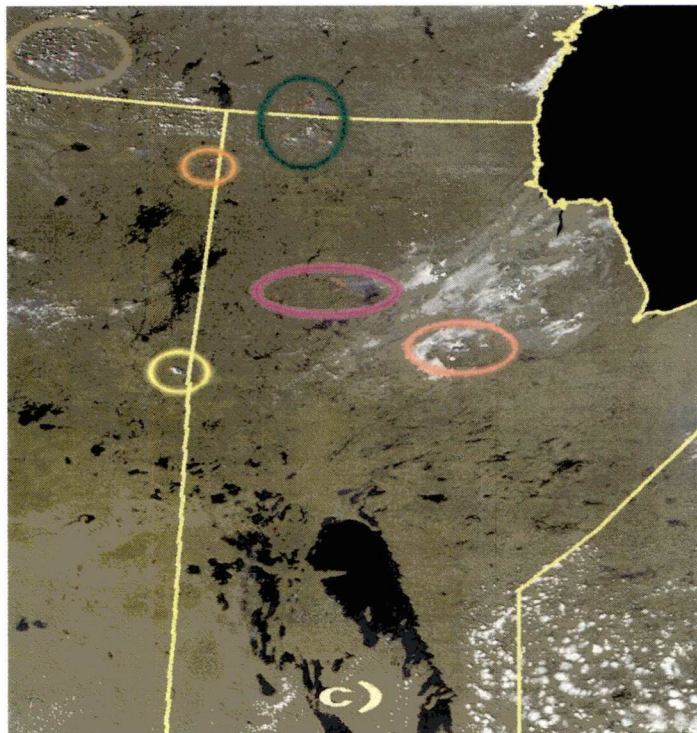
Images du 05/08/98 (figures 45 a), b) et c))

Plusieurs feux sont représentés sur l'image AVHRR et semblent également présents sur les images ATIM non-interpolée et interpolée. Ainsi, au sud du lac Duhawnt et au nord-est du lac Athabasca, une série de feux de forêt est indiquée par une épaisseur optique élevée sur l'image ATIM non-interpolée ( $0.3 < \delta_{550nm} < 0.9$ ). Cependant, l'épaisseur optique des aérosols est nettement plus faible ( $0.3 < \delta_{550nm} < 0.4$ ) sur l'image ATIM interpolée. D'autres feux de forêt, à l'est du lac Indien-sud, sont apparents sur l'image AVHRR mais sont en partie confondus avec les nuages présents sur les images ATIM. Une grande étendue de fumée, de nuages et quelques feux sont apparents au sud-ouest de la baie d'Hudson. Le modèle ATIM interpolé tend à réduire la valeur d'épaisseur optique des aérosols à cet endroit ( $0.3 < \delta_{550nm} < 0.5$ ).

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR du 05/08/98**







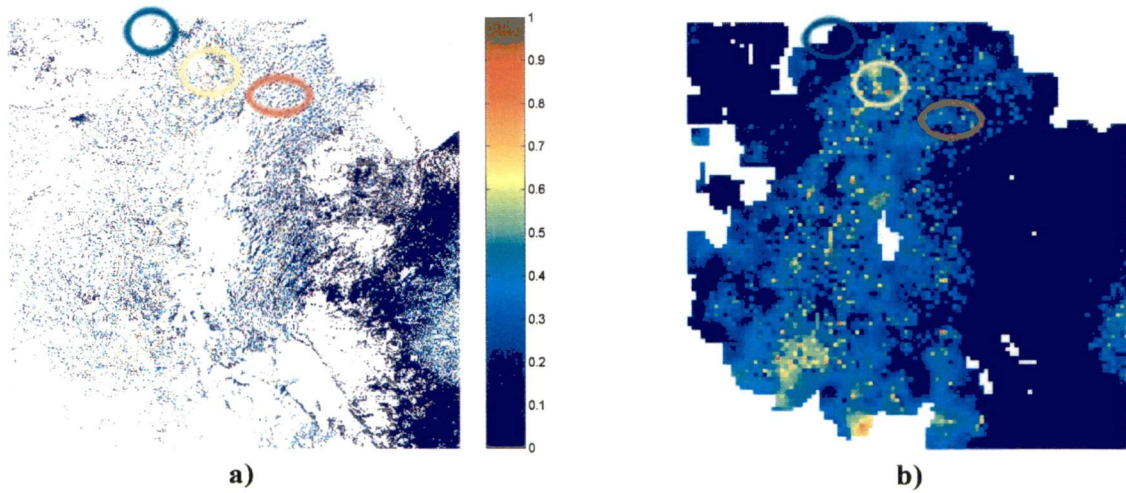
**Figure 46 : 5 août 1998**

- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR.

Images du 17/08/98 (figures 47 a), b) et c))

Aucune image AVHRR n'était disponible à cette date. Deux images, 16/08/98 et 18/08/98, ont alors servi à la comparaison. Quelques feux de forêt, confondus avec la présence de nuages, sont indiqués sur l'image ATIM interpolée au nord du lac du Caribou, de même qu'au nord-est du lac Athabasca.

**Modèle ATIM non-interpolé et interpolé et image AVHRR (le 17/08/98)**



**Figure 47 : 17 août 1998**

- a) Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- b) Interpolation de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM)
- c) Feux de forêt, image AVHRR (16 août 1998)

En général, si l'image ATIM non-interpolée possède assez de valeurs d'épaisseur optique des aérosols, il semble que la présence de feux de forêt soit alors repérable en partie. Par contre, les images ATIM interpolées ne permettent d'avoir qu'une certaine approximation de l'étendue de l'épaisseur optique des aérosols car l'interpolation réduit considérablement la valeur d'épaisseur optique. Ceci est dû au fait que la méthode d'interpolation fait une moyenne avec les pixels les plus près. Le modèle d'extraction ATIM pourrait donc, en approfondissant la méthode, aider à la représentation des feux de forêt sur les images satellitaires, par la présence d'une forte concentration d'épaisseur optique des aérosols.

Il est possible d'évaluer la variation spatio-temporelle de l'épaisseur optique des aérosols sur les images du 23 et 24 juillet (figures 42 a), b) et 43 a), b)) ainsi que les images du 3, 4 et 5 août (figures 44 a), b), 45 a), b) et 46 a), b)).

Pour le 23 et 24 juillet, les images non-interpolées ne possèdent pas assez de valeurs pour faire un suivi notable des variations spatio-temporelles de l'épaisseur optique des aérosols. Les images interpolées offrent une meilleure visualisation de l'évolution de l'épaisseur optique des aérosols dans le temps et dans l'espace. Selon ces figures interpolées, une certaine variation des plus fortes valeurs d'épaisseurs optiques des aérosols est observable.

Les images non interpolées et interpolées du 3, 4 et 5 août font le suivi dans l'évolution de l'épaisseur optique des aérosols. En somme, les fortes concentrations en épaisseur optique des aérosols peuvent être suivies temporellement et spatialement. Ainsi, d'après ces images, le modèle d'extraction ATIM permettrait de faire un suivi des variations spatio-temporelles de l'épaisseur optique des aérosols lorsqu'une série de valeurs prises dans un intervalle de jours consécutifs est disponible.



## 9.2 Validation du modèle ATIM avec les images du Sahel

L'estimation et le suivi de la couverture végétale au sol est importante pour l'agriculture et l'étude de la désertification des milieux semi-arides et arides (Purevdorj *et al.*, 1998). Il n'y a pas de méthode standard pour l'estimation quantitative du taux de couverture végétale au sol (Purevdorj *et al.*, 1998). Afin d'évaluer la présence de végétation dans un secteur donné, il est possible d'analyser les différents taux de couverture végétale par l'apport des indices de végétation. La contribution du sol, parce qu'il est en partie désertique, influence la réponse spectrale acquise au capteur. Le modèle ATIM a donc été appliqué sur des images d'une région du Sahel, près du site Ouagadougou au Burkina Faso. L'extraction de l'épaisseur optique des aérosols, par le modèle ATIM, donne la possibilité de connaître sa résistance aux effets du sol sous-jacent (celui-ci est de type sablonneux et par le fait même très brillant dans la partie visible du spectre). Le tableau 25 résume les paramètres associés aux images.

**Tableau 25** : Paramètres d'acquisition des images SPOT 4 VGT, site Ouagadougou, Burkina Faso, Afrique

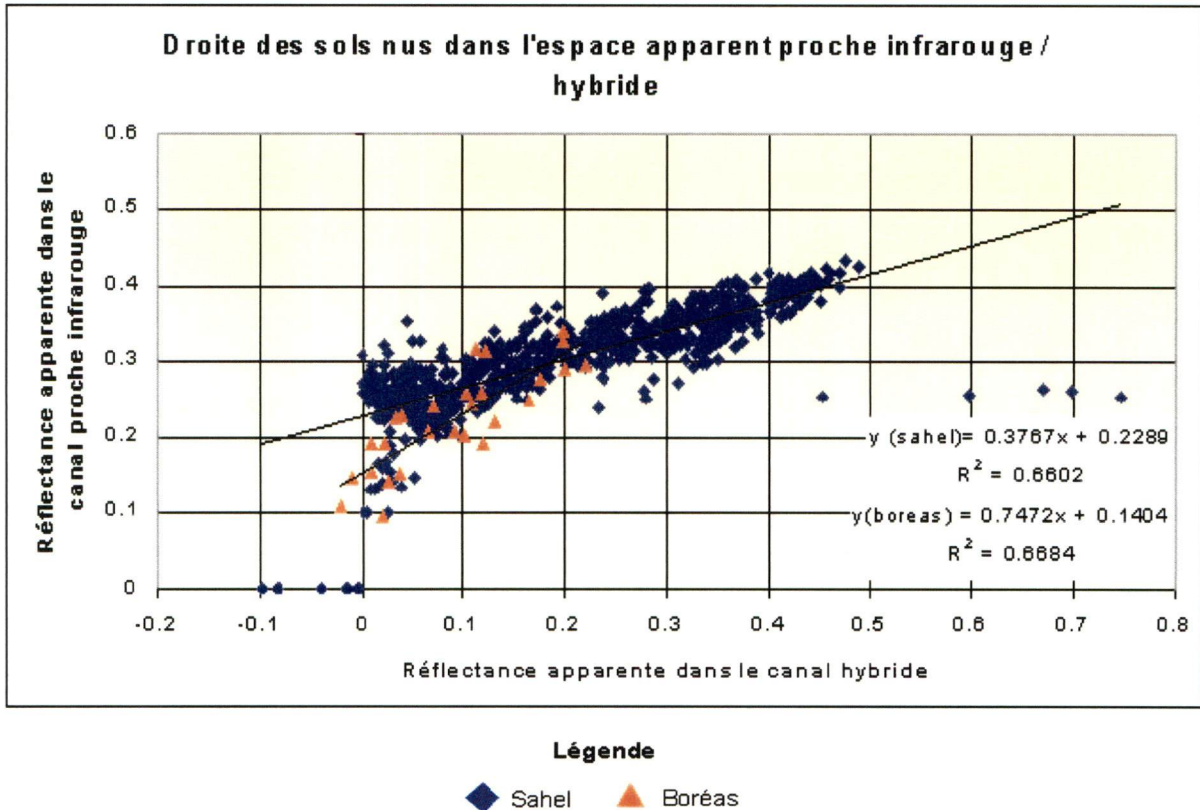
Date D'acquisition	Angle zénithal solaire ( $\theta_{\text{min}}$ ; $\theta_{\text{max}}$ )	Angle azimutal solaire ( $\phi_{\text{min}}$ ; $\phi_{\text{max}}$ )	Angle zénithal de visée ( $\theta_{\text{min}}$ ; $\theta_{\text{max}}$ )	Angle azimutal de visée ( $\phi_{\text{min}}$ ; $\phi_{\text{max}}$ )	Heure d'acquisition (hh : mm) GMT
30 septembre 1999	15.0° ; 28.0°	115.5° ; 145.5°	1.0° ; 49.5°	33.5° ; 279.0°	16h29
1 octobre 1999	15.0° ; 28.0°	115.5° ; 145.5°	1.0° ; 49.5°	100.5° ; 279.0°	16h03
1 novembre 1999	25.5° ; 38.0°	133.5° ; 154.5°	1.0° ; 46.0°	97.5° ; 279.0°	10h35
2 novembre 1999	28.5° ; 40.0°	129.0° ; 147.0°	10.5° ; 61.0°	96.0° ; 102.0°	12h05
7 novembre 1999	29.0° ; 41.5°	132.0° ; 153.0°	1.0° ; 59.5°	97.5° ; 126.0°	13h20
15 novembre 1999	26.5° ; 37.5°	150.0° ; 169.5°	4.5° ; 59.0°	89.5° ; 280.5°	12h06
21 novembre 1999	26.5° ; 37.5°	145.5° ; 163.5°	4.5° ; 59.0°	268.5° ; 280.5°	13h22
6 décembre 1999	58.5° ; 37.5°	150.0° ; 166.5°	4.5° ; 59.0°	268.5° ; 280.5°	12h12
8 décembre 1999	35.0° ; 47.5°	138.0° ; 153.0°	1.0° ; 57.5°	97.5° ; 276.0°	12h35
13 décembre 1999	35.0° ; 47.5°	139.5° ; 154.5°	1.5° ; 54.0°	97.5° ; 277.5°	13h00

La même procédure que précédemment a été employée afin de retrouver les paramètres de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride. Le tableau 26 indique les droites des sols nus pour les différentes dates.

**Tableau 26 :** Droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride, site Ouagadougou, Burkina Faso, Afrique

Date d'acquisition	Droite des sols nus	Coefficient de régression
	$\rho_{PIR}^* = a_{PIR/RB} \times \rho_{RB}^* + b_{PIR/RB}$	$R^2$
30 septembre 1999	$-0.0792\rho_{RB}^* + 0.3034$	-0.0053
1 octobre 1999	$-0.1133\rho_{RB}^* + 0.3371$	-0.1154
1 novembre 1999	$0.5509\rho_{RB}^* + 0.1515$	0.9247
2 novembre 1999	$0.4114\rho_{RB}^* + 0.2255$	0.7162
7 novembre 1999	$0.3508\rho_{RB}^* + 0.2324$	0.5649
15 novembre 1999	$0.5122\rho_{RB}^* + 0.1591$	0.8697
21 novembre 1999	$0.5407\rho_{RB}^* + 0.1495$	0.9168
6 décembre 1999	$0.5925\rho_{RB}^* + 0.1322$	0.9268
8 décembre 1999	$0.5621\rho_{RB}^* + 0.1668$	0.8710
13 décembre 1999	$0.5714\rho_{RB}^* + 0.1554$	0.8073

La figure 48 représente un exemple de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride pour les sites d'étude BOREAS et du Sahel.



**Figure 48 :**Exemple de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride, sites de Thompson- Waskesiu (le 3 août 1998) et de Ouagadougou (le 7 novembre 1999)

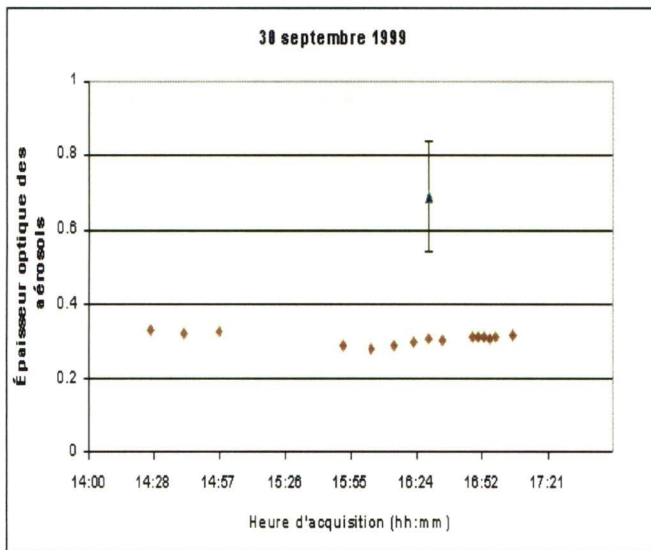
Selon la figure 48, la pente correspondant au site du Sahel est inférieure à celle du site BOREAS. Les sols clairs se différencient des sols sombres notamment par une augmentation générale de la réflectance dans le visible et le proche infrarouge. Un sol plus brillant possède ainsi une pente plus faible qu'un sol sombre.

Le modèle ATIM, appliqué aux données du Sahel, a été inversé pour des aérosols de type continental (tel qu'utilisé avec code SMAC). La figure 49 illustre la relation entre l'épaisseur optique des aérosols mesurée au sol et ramenée à 550nm et celle provenant du modèle ATIM en fonction de l'heure d'acquisition. Les résultats représentent la moyenne d'une sous-image de 100 par 100 pixels. Ainsi, la valeur extraite n'est pas celle correspondant directement à l'emplacement du photomètre, mais constitue plutôt une moyenne sur l'ensemble de la région environnante. Le tableau 27 résume l'épaisseur optique des aérosols mesurée et ramenée à 550nm sur les sur le site de Ouagadougou.

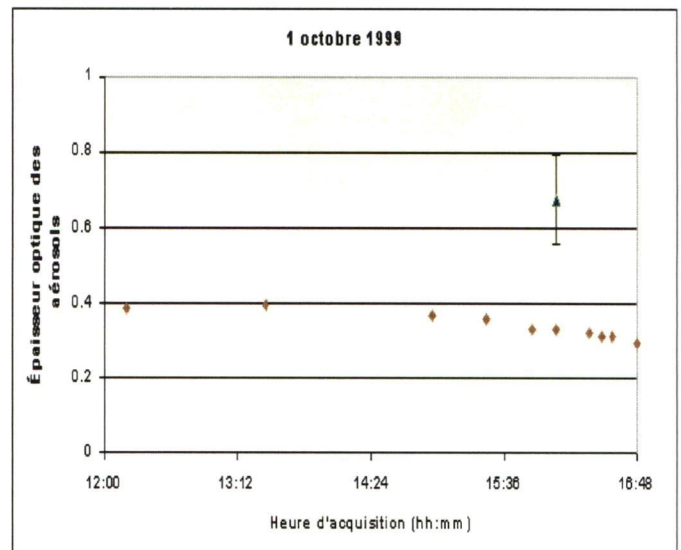


**Tableau 27** : Épaisseur optique des aérosols à 550nm et concentration en eau, site de Ouagadougou

Date d'acquisition	[eau] (g / cm <sup>2</sup> )	Épaisseur optique (550nm)
30 septembre 1999	4.23	0.307
1 octobre 1999	4.18	0.334
1 novembre 1999	2.04	0.417
2 novembre 1999	2.11	0.323
7 novembre 1999	1.77	0.104
15 novembre 1999	1.67	0.377
21 novembre 1999	1.94	0.194
6 décembre 1999	1.13	0.191
8 décembre 1999	1.16	0.404
13 décembre 1999	1.08	0.145

**Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM) en fonction de l'heure d'acquisition, site Ouagadougou**

a)

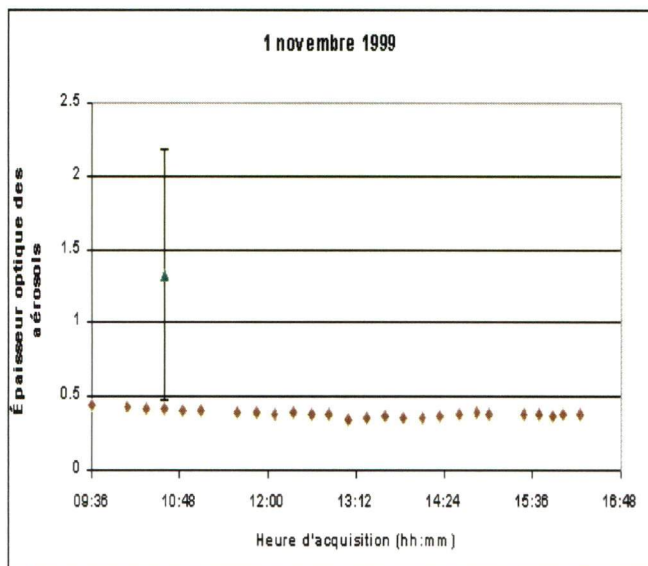


b)

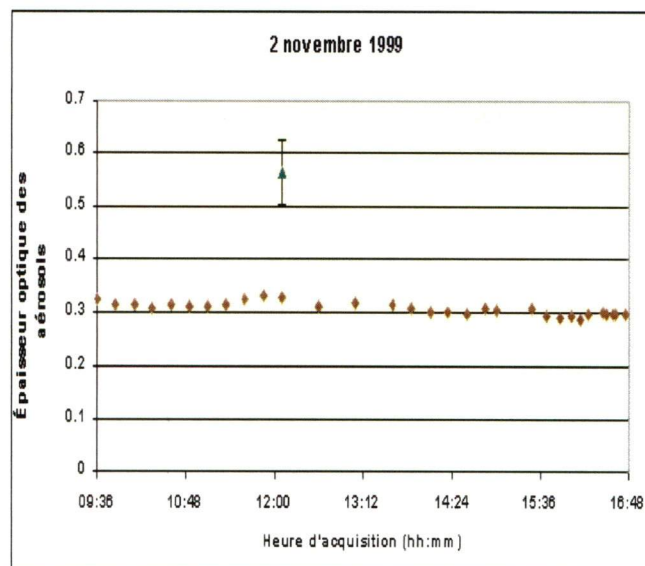
**Légende**

◆ Épaisseur optique des aérosols mesurée (550nm)    ▲ Épaisseur optique des aérosols ATIM (550nm)

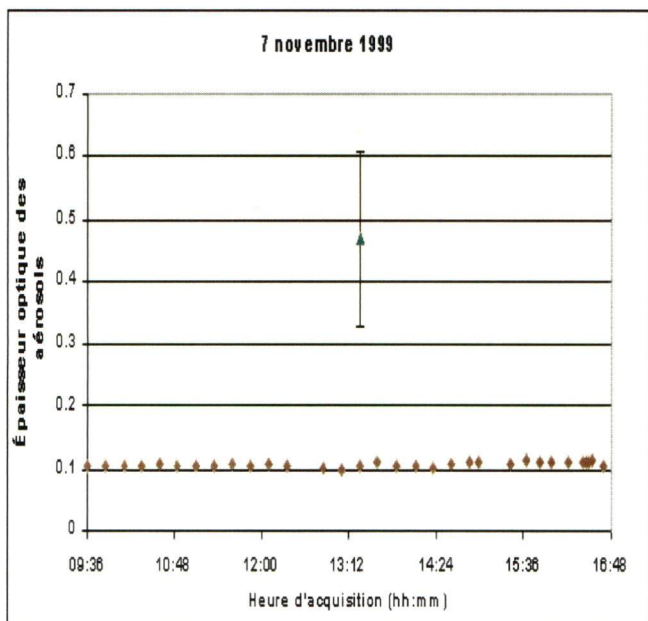
# Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM) en fonction de l'heure d'acquisition, site Ouagadougou



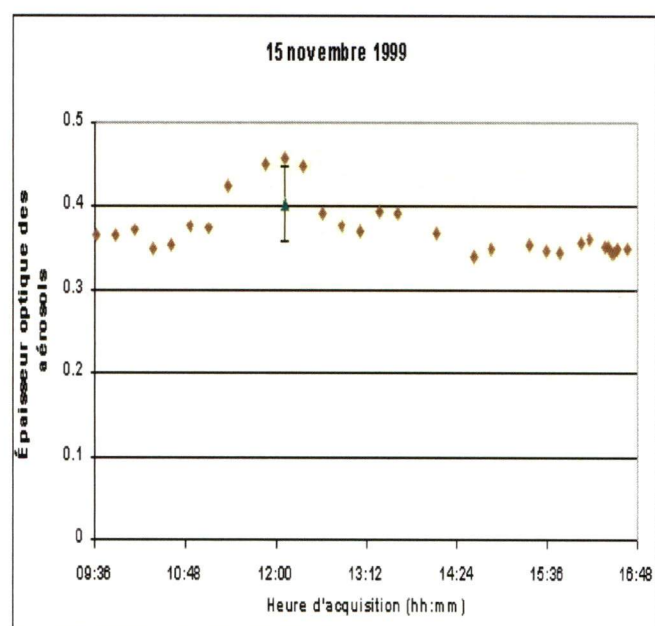
c)



d)



e)

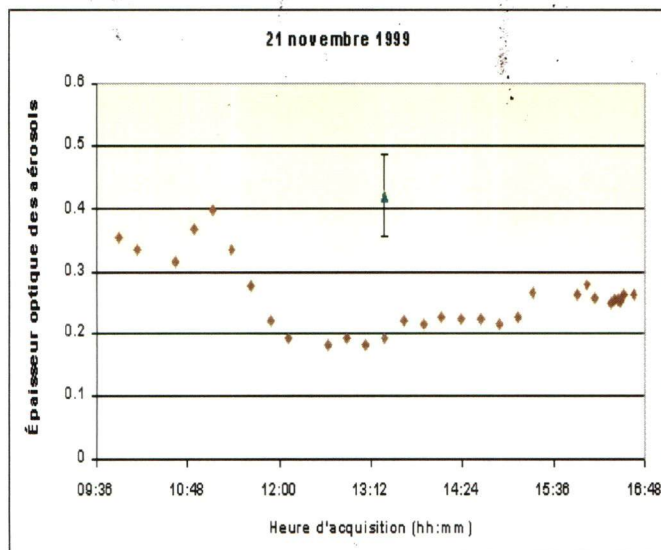


f)

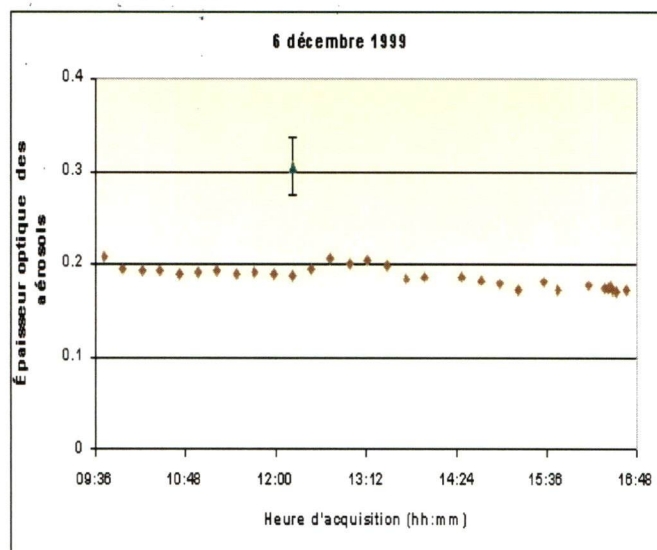
## Légende

◆ Épaisseur optique des aérosols mesurée (550nm) ▲ Épaisseur optique des aérosols ATIM (550nm)

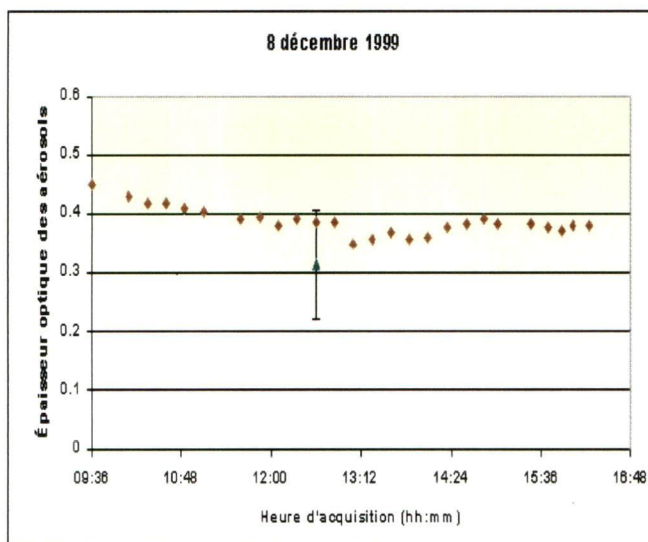
# Épaisseur optique des aérosols mesurée et simulée (modèle ATIM) en fonction de l'heure d'acquisition, site Ouagadougou



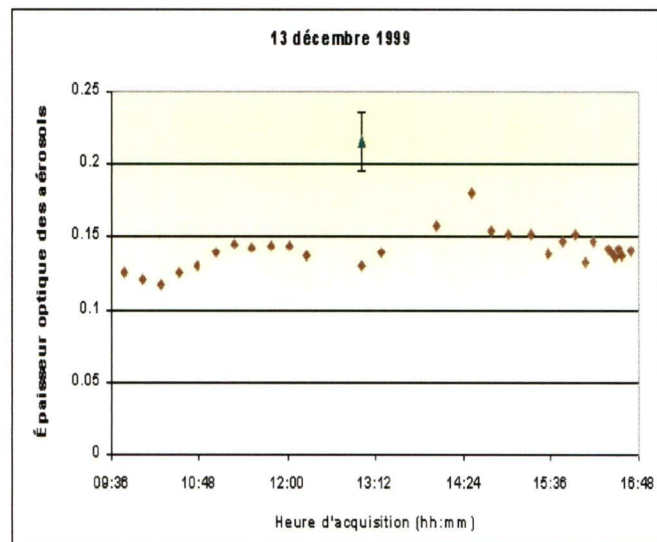
g)



h)



i)



j)

## Légende

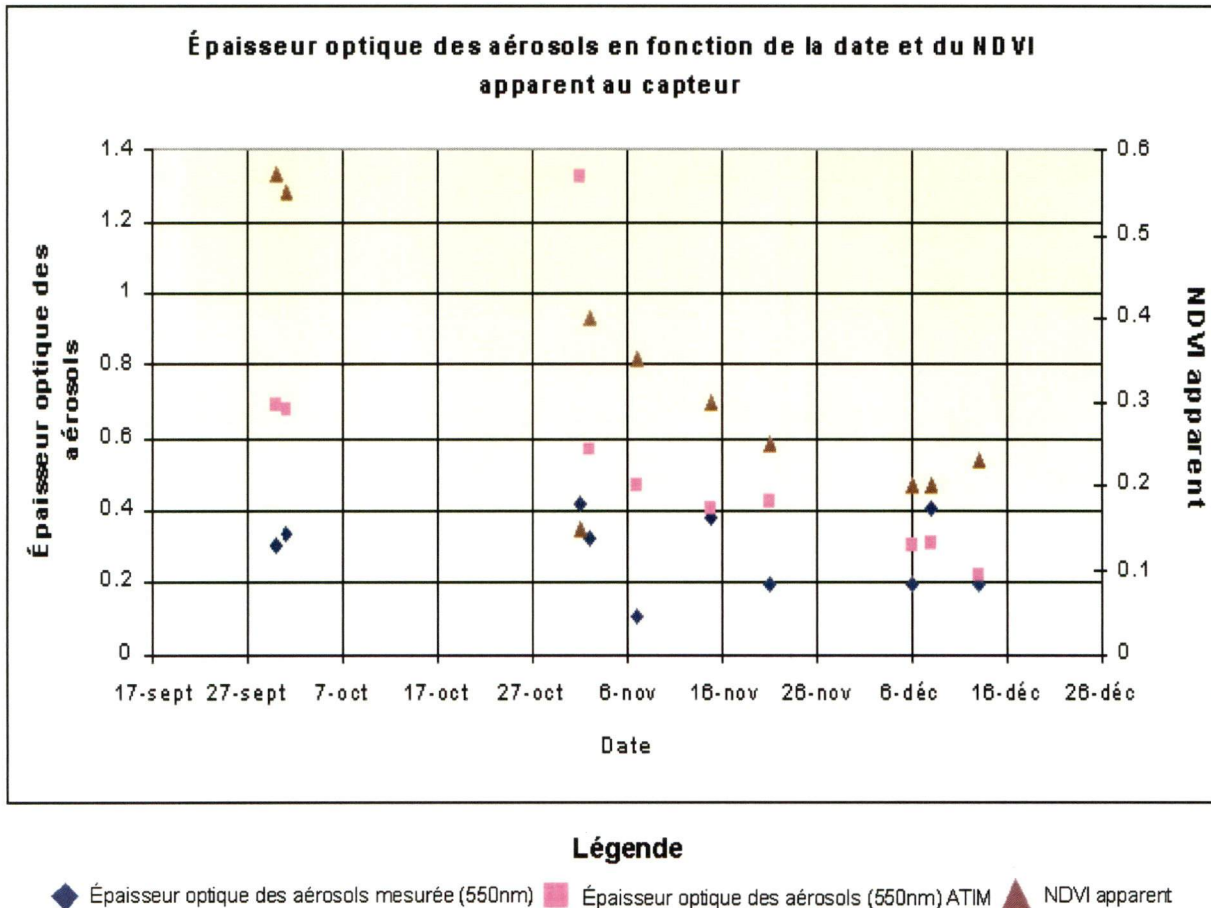
◆ Épaisseur optique des aérosols mesurée (550nm) ▲ Épaisseur optique des aérosols ATIM (550nm)

**Figure 49:** Épaisseur optique des aérosols à 550nm en fonction de l'heure d'acquisition

a) 30/09/99 b) 01/10/99 c) 01/11/99 d) 02/11/99 e) 07/11/99  
f) 15/11/99 g) 21/11/99 h) 06/12/99 i) 08/12/99 j) 13/12/99



La figure 50 illustre la relation entre les valeurs obtenues par le modèle ATIM en fonction des valeurs mesurées au sol (données AÉROCAN, voir tableau 27) pour différentes images analysés. Sur cette figure, les valeurs de NDVI apparemment ont été ajoutées.



**Figure 50 :** Épaisseur optique des aérosols à 550nm (modèle ATIM) et NDVI apparent en fonction des valeurs mesurées.

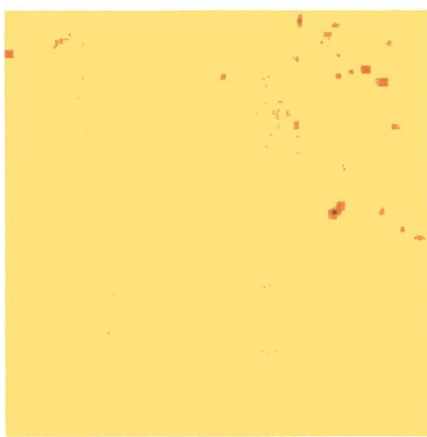
D'après les figures 49 et 50, la corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées avec le modèle ATIM est faible avec une erreur quadratique moyenne de  $\Delta\bar{\delta} = 0.12$ . Selon la figure 50, plus le NDVI apparent est élevé, plus l'épaisseur optique des aérosols extraite du modèle ATIM est élevée. Cependant, les valeurs de l'épaisseur optique des aérosols provenant du modèle ATIM ne suivent pas celles mesurées au sol.

En général, les valeurs d'épaisseur optique des aérosols sont surestimées. Plusieurs facteurs peuvent influencer le modèle ATIM. Voici donc quelques considérations à prendre en compte afin d'améliorer le modèle ATIM sur cette région d'étude :

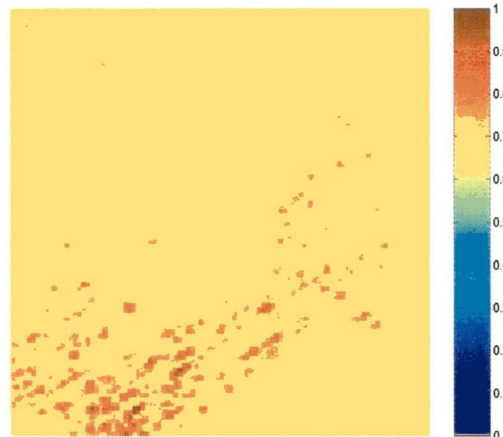
- Le facteur d'ajustement servant à calculer le canal hybride (utilisé dans le calcul de la droite des sols nus dans l'espace apparent proche infrarouge / hybride et pour l'indice apparent et finalement dans la relation linéaire entre les indices de végétation) pourrait être variable selon le type de couvert présent (sable et sol nu dans ce cas-ci) et le type d'aérosols employé.
- La droite des sols nus pourrait également être variable selon le type de couvert et selon l'endroit où le modèle est appliqué (au lieu d'avoir une droite des sols nus unique pour l'image entière). Le type de couvert au sol (sable ou sol très sec) est très brillant et entraîne une surestimation des valeurs de réflectance du canal moyen infrarouge pour le calcul de la droite des sols nus.
- Le type d'aérosols, employé lors de l'application du modèle ATIM, devrait être le même que celui correspondant à la région d'étude. Ainsi, la relation entre les deux indices de végétation a été simulée (à la section 6.4) pour des aérosols de type désertique mais a été appliquée pour des aérosols de type continental.
- Réduire les effets directionnels dans le couvert.

Ces facteurs rendent le modèle ATIM sensible à ces images et donc à l'estimation de l'épaisseur optique des aérosols. L'application du modèle ATIM, sur les régions désertiques, n'est donc pas optimisée pour procurer des valeurs d'épaisseur optique des aérosols près des valeurs mesurées. L'amélioration apportée par le modèle ATIM est peu significative dans ce cas mais serait possible en ajoutant quelques raffinements au modèle. La figure 51 illustre la cartographie de l'épaisseur optique des aérosols sur le site de Ouagadougou.

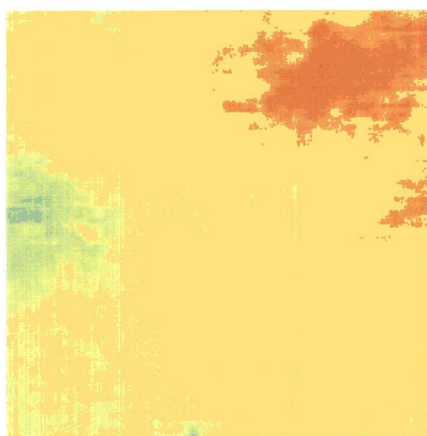
**Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm avec le modèle ATIM,  
site Ouagadougou**



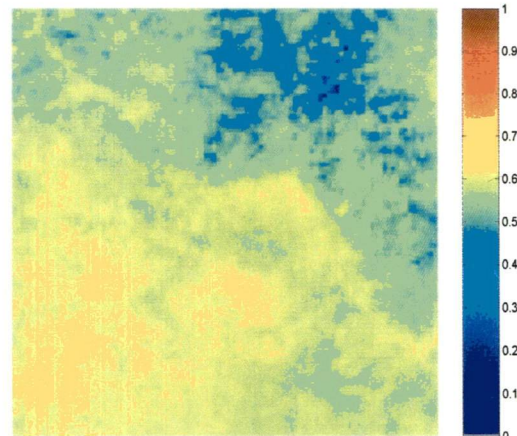
a)



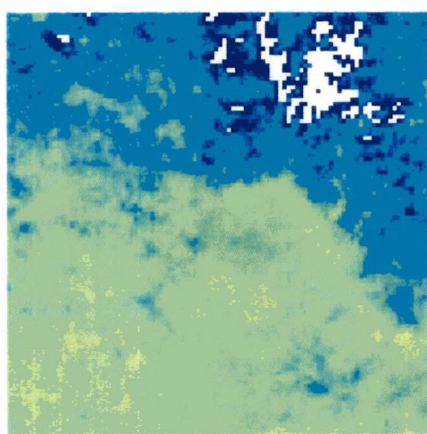
b)



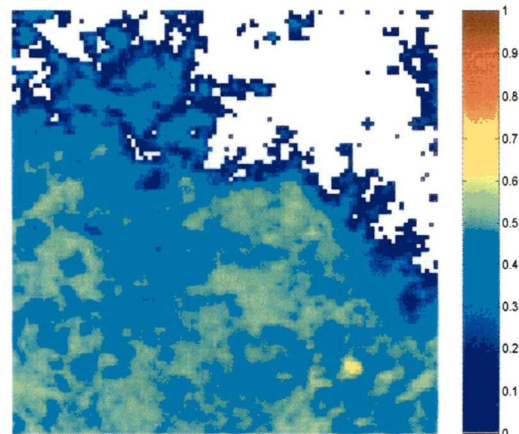
c)



d)

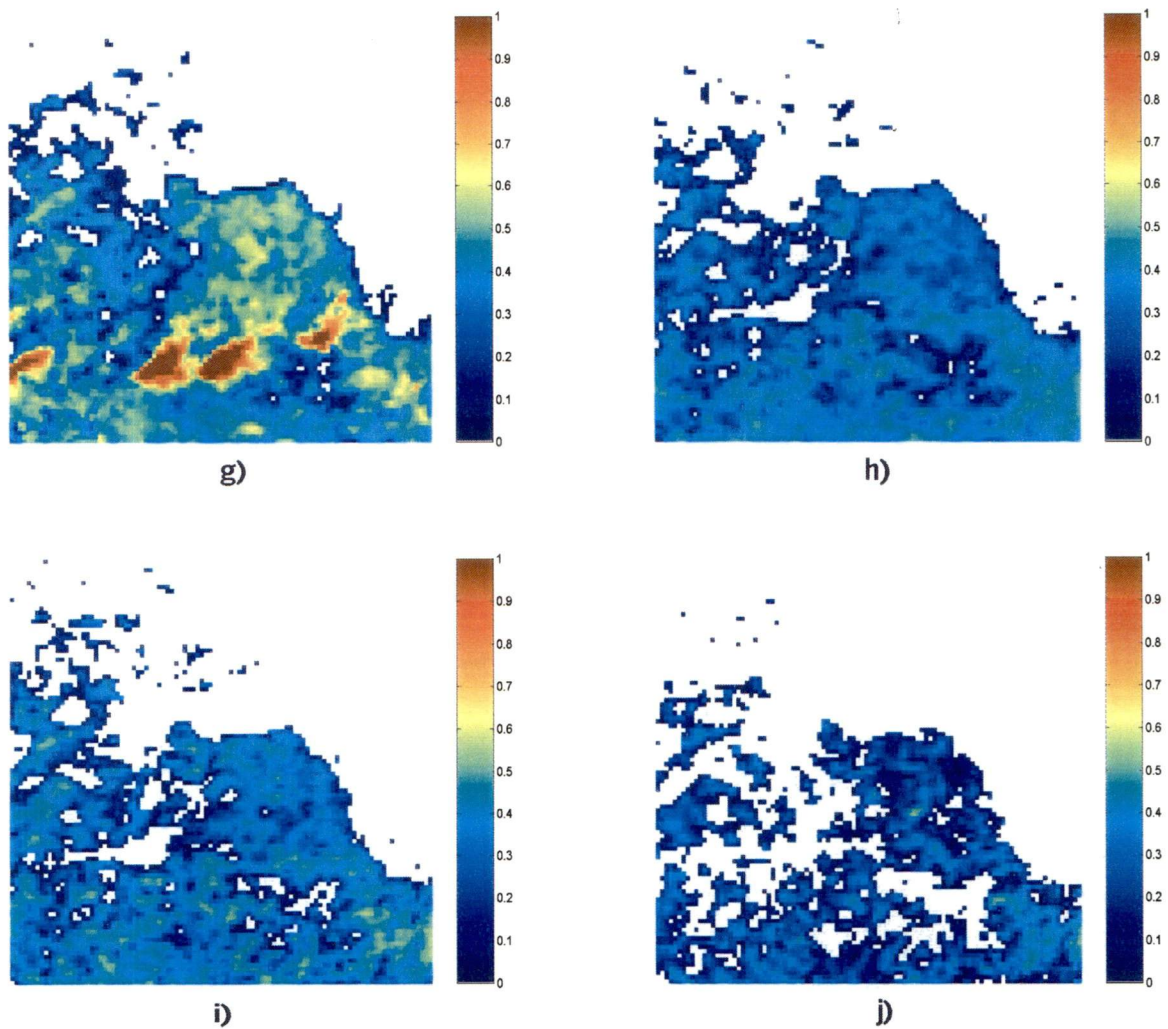


e)



f)

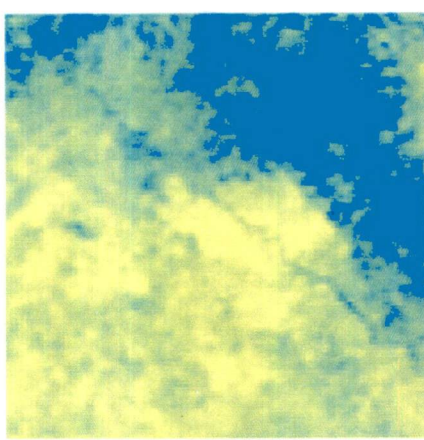




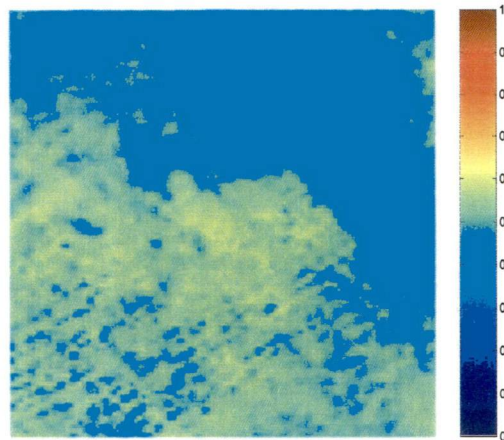
**Figure 51 :** Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm sur la région de Ouagadougou,  
a) 30/09/99 b) 01/10/99 c) 01/11/99 d) 02/11/99 e) 07/11/99  
f) 15/11/99 g) 21/11/99 h) 06/12/99 i) 08/12/99 j) 13/12/99

Afin de mieux voir l'influence du couvert végétal sur le modèle ATIM, une cartographie de l'indice de végétation NDVI apparent au capteur est présentée à la figure 52. L'indice de végétation NDVI fait ressortir les zones comportant de la végétation.

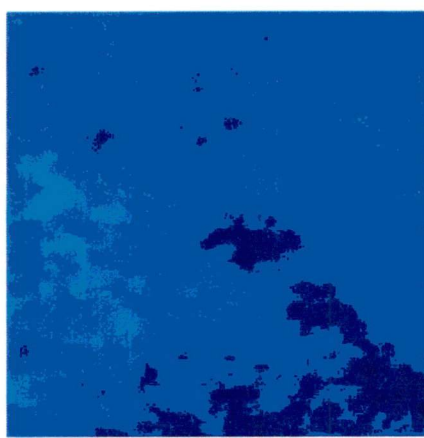
### Cartographie du NDVI apparent au capteur, site Ouagadougou



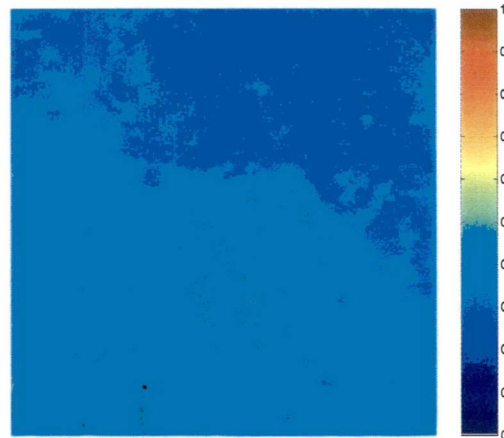
a)



b)



c)



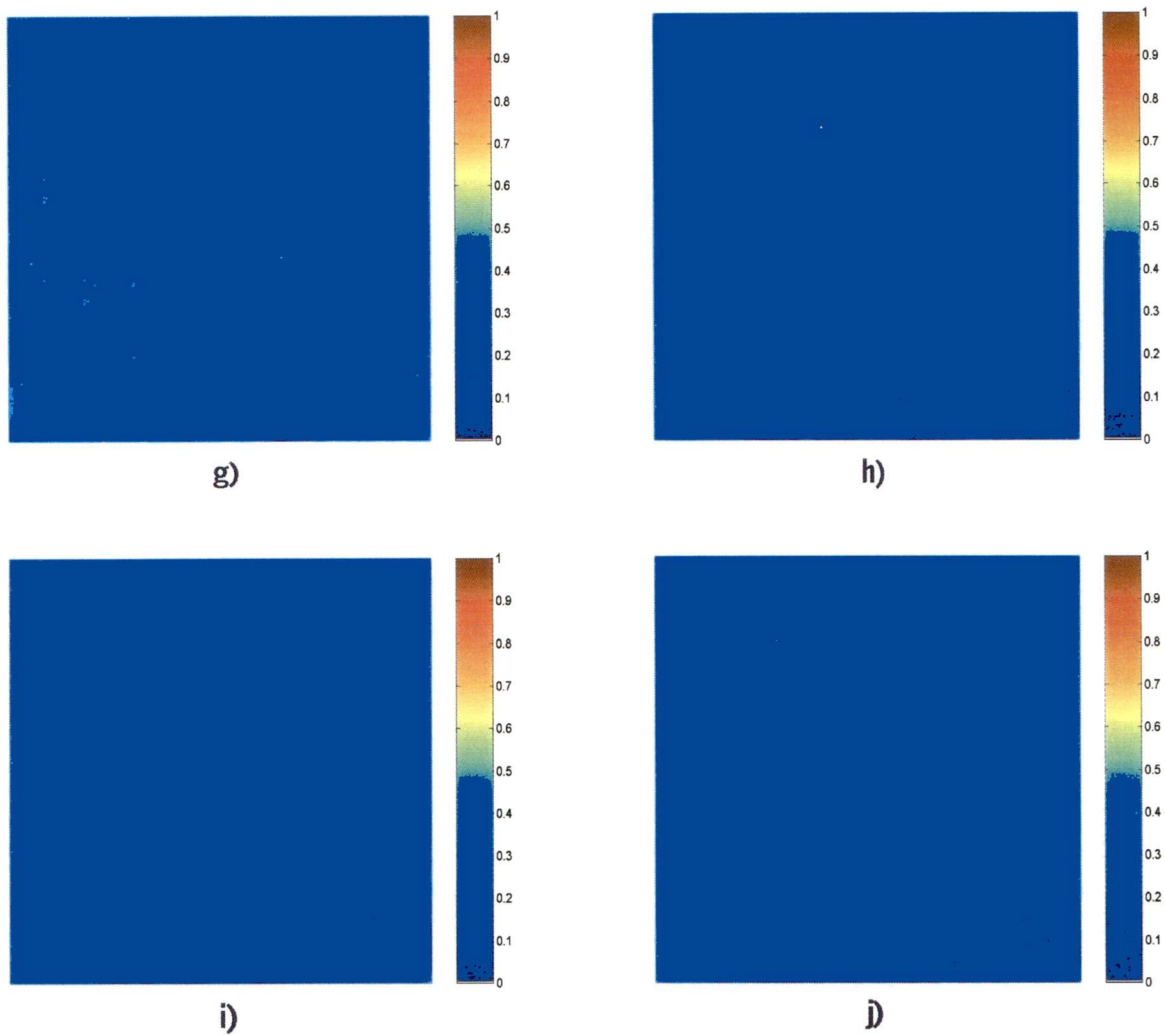
d)



e)



f)



**Figure 52** : Cartographie du NDVI apparent au capteur au-dessus de la région de Ouagadougou

a) 30/09/99 b) 01/10/99 c) 01/11/99 d) 02/11/99 e) 07/11/99  
f) 15/11/99 g) 21/11/99 h) 06/12/99 i) 08/12/99 j) 13/12/99

Selon les figures 51 et 52, le modèle ATIM fait la cartographie de l'épaisseur optique des aérosols lorsqu'il y a présence de végétation ( $\text{NDVI} > 0.4$ ). Certaines restrictions, notamment sur le type de couverture végétale (tel que les sols secs ayant un couvert végétal de faible densité sont très brillants et influencent le modèle ATIM), font en sorte que le modèle ATIM ne peut être appliqué sur toutes les surfaces. Les simulations antérieures laissaient présager que le modèle ATIM ne serait pas optimisé pour ce type de couvert. Il serait nécessaire d'approfondir les paramètres énumérés précédemment pour que le modèle ATIM puisse être appliqué sur des zones désertiques et qu'il soit moins sensible à la brillance des sols.



## 10. Conclusion

Ce projet a permis l'étude du potentiel des données de télédétection transformées en indices de végétation pour retrouver l'épaisseur optique des aérosols. Le principe de la méthode est de comparer les indices de végétation ARVI, TSARVI et ATI apparents au capteur aux valeurs de NDVI, TSAVI et TSAVI<sub>mod</sub> au sol selon une relation linéaire entre les deux catégories indices. Ces indices sont employés dans le modèle d'extraction ATIM afin de retrouver les valeurs d'épaisseur optique des aérosols en utilisant un modèle de transfert radiatif.

D'après les simulations théoriques, il semble que le modèle ATIM (avec les différentes relations entre les indices de végétation) puisse réduire les erreurs d'estimation de l'épaisseur optique des aérosols par rapport à la méthode utilisant la végétation dense (modèle DDV). Contrairement au modèle DDV, le modèle ATIM ne nécessite pas une connaissance aussi précise du couvert végétal. Nous avons pour cela simulé les modèles ATIM et DDV pour plusieurs types de couverture végétale et pour différents indices foliaires. C'est le modèle qui utilise la relation entre les indices ATI et TSAVI<sub>mod</sub> qui procure la meilleure corrélation avec les valeurs réelles. En effet, le modèle ATIM, avec les indices ATI et TSAVI<sub>mod</sub>, permet l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols à partir d'un NDVI > 0.2 (avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 3%) alors que le modèle DDV n'est efficace qu'à partir d'un NDVI > 0.7. Selon ces mêmes simulations théoriques, le modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols DDV est préférable au modèle ATIM (avec les différentes combinaisons d'indices de végétation) lorsque la couverture végétale est dense (NDVI > 0.7).

Il a été établi que le modèle ATIM est sensible aux angles zénithaux de visée ainsi qu'au type d'aérosols. Nous avons démontré cette sensibilité par des simulations en fonction de divers angles zénithaux de visée ainsi qu'avec des aérosols de type continental, urbain et désertique. Selon les simulations théoriques, le modèle ATIM pourrait être modifié pour prendre en compte l'effet des angles de visée pour des angles zénithaux de visée inférieurs à 70°. En général, le modèle ATIM procure une bonne estimation de

l'épaisseur optique des aérosols lorsque le site d'étude possède des aérosols de type continental. Par contre, le modèle ATIM, employé pour des aérosols de type urbain ou désertique et inversé pour des aérosols de type continental, ne satisfait pas à l'extraction de l'épaisseur optique. Ceci est particulièrement évident lorsque les aérosols sont de type désertique : dans ce cas, les valeurs de l'épaisseur optique ne sont pas corrélées aux valeurs réelles, elles sont nettement surestimées. Une bonne connaissance de ces paramètres est préférable à l'application du modèle et offrirait une plus grande précision dans l'extraction de l'épaisseur optique des aérosols.

L'application aux images satellitaires a mis en évidence que le modèle ATIM extrait des valeurs d'épaisseur optique des aérosols à partir d'un NDVI plus faible ( $\text{NDVI} > 0.2$ , avec une erreur quadratique moyenne de 7.2%) que pour le modèle DDV ( $\text{NDVI} > 0.5$ , avec une erreur quadratique moyenne de 7.4%). Toutefois, la forte sensibilité du modèle ATIM à la réflectance de surface élevée (surface de type désertique) nécessite une bonne connaissance de ce paramètre. La corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs obtenues des modèles d'extraction ATIM et DDV reste toute de même faible. Le modèle ATIM semble préférable d'application lorsque qu'il est employé au-dessus des zones boréales dont la couverture est relativement dense à plusieurs endroits. Cependant, il surestime nettement la valeur d'épaisseur optique des aérosols lorsqu'il est employé sur une région de type désertique (avec une erreur quadratique moyenne de 12%).

Lorsque des images de dates successives sont disponibles, un suivi des variations spatio-temporelles de l'épaisseur optique des aérosols est possible avec le modèle d'extraction ATIM. Ce suivi des variations spatio-temporelles de l'épaisseur optique des aérosols permet la localisation de feux de forêt. Ceci est possible dans la mesure où une quantité suffisante de pixels procure une épaisseur optique des aérosols sans correspondre à la présence de nuage. Les feux de forêt sont repérables sur les images ATIM par une forte concentration en aérosols.

Quelques recommandations sont proposées dans le but d'optimiser le modèle ATIM :

- Modifier le facteur d'ajustement ( $\gamma$ ) en fonction du type d'atmosphère pour le calcul du canal hybride, des indices de végétation et de la droite des sols nus.
- Caractériser la droite des sols nus dans l'espace proche infrarouge / hybride selon le type de sol et le type d'atmosphère (parce que la droite des sols nus est calculée à partir des réflectances apparentes, elle est influencée par les effets atmosphériques). Cette caractérisation permettrait d'obtenir une droite des sols nus indépendante selon la région d'étude d'un certain périmètre. La droite des sols nus est directement reliée à l'indice de végétation apparent (par la pente et l'ordonnée à l'origine) ce qui optimiserait, dans un même temps, la relation entre les indices de végétation.
- Définir la droite des sols nus de façon à ce qu'elle soit plus près de la droite des sols nus théorique, soit par une meilleure sélection des pixels de sols nus. Vérifier la sensibilité du modèle d'inversion aux variations de la droite des sols nus.
- Utiliser des angles zénithaux de visée qui réduisent les effets directionnels.
- Employer le même type d'atmosphère que lors de l'inversion des réflectances apparentes pour retrouver les réflectances au sol. Ce type d'atmosphère est utilisé à partir du modèle de transfert radiatif.
- Vérifier les effets d'étalonnage du capteur et l'effet des largeurs de bandes spectrales si un autre capteur est utilisé.

Par ailleurs, il serait intéressant de comparer la méthode ATIM, appliquée sur les données de SPOT 4 VGT, avec d'autre méthode telle que la méthode itérative « R-iter »



(Maisongrande *et al.*, 2000). Cette méthode emploie une relation entre les bandes bleue et infrarouge de courtes longueurs d'onde qui est reliée par la suite à l'indice NDVI. Cette méthode de correction est conçue pour les données provenant de SPOT 4 VGT et serait donc utile à la comparaison du modèle ATIM. Il est à noter que cette approche nécessite au moins trois bandes spectrales (bleu, rouge et proche infrarouge) et n'est donc pas utilisable avec AVHRR. Le modèle ATIM serait applicable avec le capteur MODIS puisque celui-ci possède des bandes spectrales comprises entre 405nm et 2155nm.

L'avantage principal du modèle ATIM est que le type de sol et le taux de couverture végétale n'ont pas à être connus a priori lorsqu'il est appliqué sur une zone de végétation moyennement dense ou éparse, comme c'est le cas pour le modèle DDV. De ce fait, il est possible de retrouver l'épaisseur optique des aérosols en utilisant une relation linéaire entre certains indices directement sur des images satellitaires. Bien que les zones de végétation constituent une bonne cible pour l'application du modèle ATIM, il serait donc intéressant, dans le suivi de ce projet, d'optimiser le modèle ATIM afin de le rendre applicable sur tous les types de couverture végétale. De même, le modèle ATIM devrait optimiser en fonction du type de couverture végétal par la contribution de différentes relations entre les indices de végétation qui permettent de minimiser les effets des sols nus et de l'atmosphère.

En conclusion, les simulations théoriques, contrairement aux validations du modèle ATIM, ont démontré que le modèle ATIM est plus précis que la méthode DDV. Les raffinements apportés au modèle ATIM devraient entre autre, lui permettre d'être moins sensible à la brillance des sols, aux effets des angles et du type d'aérosols. Le modèle d'extraction de l'épaisseur optique des aérosols ATIM serait, s'il subissait quelques corrections pour ajuster le modèle, une amélioration aux méthodes d'extraction l'épaisseur optique des aérosols.

## 11. Références

- Bacour, C. (1999) Introduction à l'étude de la végétation par télédétection. Institut de physique du globe de Paris, France, <http://www.ipgp.jussieu.fr/>.
- Bannari, A. (1996) La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparse et moyennement dense : cas de l'environnement urbain. Thèse de doctorat (Ph.D), Université de Sherbrooke (2500 boul. Université, Sherbrooke, J1K 2K1). Québec, Canada, 235 p.
- Bannari, A., He, D.C., Morin, D., Anys, H. (1998) L'analyse de l'apport de deux indices de végétation à la classification dans les milieux hétérogènes. *Journal canadien de télédétection*, vol. 24, n. 3, p 233.
- Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D., Bonn, F. (1995) A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, p. 95.
- Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D., Zagolski, F. (1996) Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n. 10, p. 1885.
- Bannari, A., Morin, D., Haboudane, D. (1999) Analyse des effets atmosphériques sur les indices de végétation en milieu urbain. *Télédétection*, vol. 1, p. 19.
- Bannari, A., Morin, D., He, D.C. (1994) High spatial and spectral resolution remote sensing for the management of the urban environment. *First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France, vol. III, p. 247.
- Bannari, A., Royer, A., Morin, D. (1997) L'indice de végétation TSARVI : Transformed Soil Atmospherically Resistant Vegetation Index. *Comptes-rendu Int. Coll. Sur les signatures spectrales*, Courchevel, France.
- Baret, F., Andrieu, B. (1999), Rapport technique. Intérêt du moyen infrarouge réflectif pour caractériser la végétation. Institut National de la Recherche Agronomique Bioclimatologie (147, rue de l'Université, 75 338, Paris Cedex 07, France), 14 p.
- Baret, F., Guyot, G., Major, D.J. (1989) TSAVI : A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Canadian Symposium in Remote Sensing*, Vancouver, Canada, p. 1355.
- Baret, F., Guyot, G. (1991) Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 161.
- Baret, F., Jacquemoud, S., Hanocq, J.F. (1993) The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, vol. 7, p. 65.



Boucher, O., Tanré, D., Goloub, P. (1997) Remote Sensing of Aerosols : Principles and Applications. *In* Proceedings of the Advanced Study Course on Tropospheric Chemistry and Space Observation, Riom, European Commission, Air Pollution report Research No 65, <http://www-loa.univ-lille1.fr/~boucher/preprints/list/publi.html> .

Carlson, T.N., Ripley, D.A. (1997) On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment* vol. 62, p 241.

Chomette, O. (1999) Modélisation et analyse méso-échelle du cycle de l'aérosol désertique. Aspects radiatifs et dynamiques. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France.

D'Almeida, G.A., Koepke, P., Shettle, E.P. (1991) Atmospheric Aerosols : Global Climatology and Radiative Characteristics. A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, 561 p.

Deschamps, P.Y., Herman, M., Tanré, D. (1983) Definitions of atmospheric radiance and transmittances in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, p. 89, <http://www-loa.univ-lille1.fr/>.

Dupaire, J.P., Gentet, T., Phulpin, T., Arnaud, M. (1995) SPOT 4 VEGETATION instrument: Vegetation Monitoring on a Global Scale. *Acta Astronautica*, vol. 35, n. 7, p. 453.

Eastwood, J.A., Plummer, S.E., Wyatt, B.K., Stocks, B.J. (1998) The potential of SPOT 4 VEGETATION data for fire scar detection in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n. 18, p. 3681.

Fedosejevs, G., O'Neill, N.T., Royer, A., Teillet, P.M., Bokoye, A.I., McArthur, B. (2000) Aerosols Optical Depth for Atmospheric Correction of AVHRR Composite Data., *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n. 4, p. 273.

Gao, B.C. (1996) NDWI: A Normalized Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, p. 257.

Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., Smirnov (1998) A AERONET -- A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, 1998, vol. 66, n. 1, p. 1.

Holben B., Nelson R., Newcomb W., Jones D. (2000) AERONET Project. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, U.S.A., <http://www.aeronet.gsfc.nasa.gov/>.

Hu, B., Lucht, W., Strahler, A.H. (1998) The Interrelationship of Atmospheric Correction of Reflectances and Surface BDRF Retrieval : A Sensitivity Study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, n. 2, p. 724.



Huete, A.R. (1988) A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* vol. 25, p. 295.

Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F. (1985) Spectral Response of a Plant Canopy with Different Soil Background. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 37.

Huete, A.R., Justice, C., van Leeuwen, W. (1999), MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document, version 3, University of Arizona (1200 E. South Campus Drive, 429 Shantz Bldg. n. 38, Tucson, Arizona, 85721) and University of Virginia (Department of Environmental Sciences, Clark Hall, Charlottesville, VA, 22903).

Huete, A.R., Liu, H.Q. (1994) An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric and Soil Correction Variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, n. 4, p. 897.

Isakov, V.Y., Feind, R.E., Vasilyev, O.B., Welch, R.M. (1996) Retrieval of aerosol optical thickness from AVIRIS data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n. 11, p. 2165.

Jackson, R.D., Slater, P.N., Pinter, P.J. (1983) Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmosphere. *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, p. 187.

Kaufman, Y.J. (1988) Atmospheric Effect on Spectral Signature : Measurements and Corrections. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, n. 4, p. 441.

Kaufman, Y.J. (1993) Measurements of the aerosol optical thickness and the path radiance – Implications on aerosol remote sensing and atmospheric corrections. *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, p. 2677.

Kaufman, Y.J., Sendra, C. (1988) Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near infrared satellite imagery. *International journal of Remote Sensing*, vol. 9, n. 8, p. 1357.

Kaufman, Y.J., Tanré, D. (1992) Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n. 2, p261.

Kaufman, Y., Tanré, D. (1996) Strategy for Direct and Indirect Methods for Correcting the Aerosols Effect on Remote Sensing : From AVHRR to EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p. 65.

Kaufman, Y., Tanré, D., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A., Holben, B.N. (1997) Operational remote Sensing of Tropospheric Aerosol Over Land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n. D14, p. 17 051.

Kaufman, Y., Wald, A.E., Remer, L.A., Gao, B.C., Li, R.R., Flynn, L (1997) The MODIS 2.1 $\mu$ m channel correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, vol. 35, n. 5, p. 1286.

Landis, D., Hall, F.G. (1999) The BOREAS Project. *In* The BOREAS Information System, BOREAS, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland., U.S.A., [http://boreas.gsfc.nasa.gov/BOREAS/BOREAS\\_Home.html](http://boreas.gsfc.nasa.gov/BOREAS/BOREAS_Home.html).

L'Atlas national du Canada (2000) L'Atlas national du Canada en ligne, évolution territoriale du Canada de 1867 à 1999, Ministère des Ressources naturelles du Canada, <http://atlas.gc.ca>

Leblon, B., Foresman, T., Serpi, T. (1999) Soil and Vegetation Optical Properties. *In* Volume 4 : Applications in Remote Sensing (Department of Geography, University of Maryland Baltimore County, 1000 Hilltop Circle, Baltimore Maryland 21250, U.S.A.), <http://umbc.7.umbc.edu/~tbenja1/leblon/>.

Lee, T.Y., Kaufman, Y.J. (1986) Non-Lambertian Effects on Remote Sensing of Surface Reflectance and Vegetation Index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 24, n. 5, p. 699.

Leprieur, C., Kerr, Y.H., Mastorchio, S. (2000) Monitoring vegetation cover across semi-arid regions : comparison of remote observation from various scales. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, n. 2, p. 281.

Lissens, G., Kempeneers, P., Fierens, F. (1999) Rapport de recherche, Development of a cloud, snow and cloud shadow mask for VEGETATION imagery, Flemish Institute for Technological Research (VITO, Boeretang 200, B-2400 MOL, Belgique), 4 p.

Maisongrande, P., Duchemin, B., Berthelot, B., Dubegny, C., Dedieu, G., Leroy, M. (2000) A new algorithmic concept for atmospheric correction of surface reflectance delivered by the VEGETATION system. CESBIO (18 av. E. Belin, 31 401, Toulouse, France cedex, 4), 6 p.

Martin, M.E., Viau, A.A. (2000) Évaluation du potentiel du GEMI par rapport au NDVI pour suivre l'évolution des couverts forestiers en milieux boréaux. *Journal canadien de télédétection*, vol. 26, n. 1, p. 1.

Mc Clatchey, R.A., Fenn, R.W., Selby, J.E.A., Volz, F.E., Garing, J.S. (1971) Optical properties of the atmosphere. AFCRL-TR-71-0279, Environmental Research Papers, n. 354, L.G. Bedford, Mass., États-Unis.

Myneni, R.B., Asrar, G. (1994) Atmospheric Effects and Spectral Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, vol. 47, p. 390.

Olbert, C. (1998) Atmospheric Correction for *casi* Data using an Atmospheric Radiative Transfer Model. *Journal canadien de télédétection*, vol. 24, n. 2, p. 114.

O'Neill, N.T., Royer, A., Xu, Q.F., Teillet, P.M. (1997) Retrieval of atmospheric optical parameter from airborne flux measurements : application to the atmospheric correction of imagery, *Applied Optics*, vol. 36, n. 3, p. 662.



O'Neill, N.T., Royer, A., (1993) AEROCAN: Le réseau de photomètres solaires canadiens, the Canadian Sun-photometer Network, Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke (2500 boul. Université, Sherbrooke J1K 2K1), Canada, [http://www.callisto.si.usherb.ca/~abokoye/aerocan\\_index\\_e.html](http://www.callisto.si.usherb.ca/~abokoye/aerocan_index_e.html).

O'Neill, N.T., A. Royer, M.N. Nguyen. (1996) Canadian Advanced Modified 5S (CAM5S), Scientific and Technical Report on the Development of a Modified Version of the H5S code which incorporates major features of the 6S code. Rapport interne du CARTEL, Université de Sherbrooke (2500 boul. Université, Sherbrooke J1K 2K2), Canada, 1996-020, 29 pages.

Paré, N. (2000) Rapport de recherche. Méthode d'inversion de l'épaisseur optique des aérosols, à partir d'images de télédétection, basée sur un nouveau modèle d'indice atmosphérique. Université de Sherbrooke (2500 boul. Université, Sherbrooke, J1K 2K1), Québec, Canada, 42 p.

Paré, N., Royer, A., O'Neill, N.T., (2001) Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols par télédétection satellite, basée sur un modèle d'indices atmosphériques ATIM. Compte-Rendu du 23<sup>e</sup> Symposium canadien sur la télédétection / 10<sup>e</sup> Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sainte-Foy, Québec.

Pinty, B., Verstraete, M.M., Dickinson, R.E. (1989) A physical Model for Predicting Bidirectional Reflectances over Bare Soil. Remote Sensing of Environment, vol. 27, p. 273.

Purevdorj, Ts., Tateishi, R., Isiyama, T., Honde, Y. (1998) relationship between percent vegetation cover and vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n. 18, p. 3519.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y., Sorooshian, S. (1994) A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, vol. 47, p. 1.

Rahman, H., Dedieu, G (1994) SMAC : a simplified method for the correction of satellite measurements in the solar spectrum. International Journal of Remote Sensing, vol. 15, n. 1, p. 123.

Richardson, A.J., Wiegand, C.L. (1977) Distinguishing vegetation from soil background information. Photogramm. Eng. Remote Sensing, vol. 43, p. 1541.

Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C. (1974) Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Maryland, USA, 164 p.

Sellers, P.J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, p. 1335.

Soufflet, V. (1992) Étude des aérosols troposphériques à partir du sol et de l'espace, application aux corrections atmosphériques. Thèse de doctorat (PhD). Université des sciences et technologies de Lille, France, 143 p.



Soufflet, V., Tanré, D., Royer, A., O'Neill, N.T. (1997) Remote Sensing of Aerosols over Boreal Forest and Lake Water from AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 60, p. 22.

Tanré, D., Deschamps, P.Y., Deveaux, C., Herman, M. (1988) Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n. 15, p. 15 955.

Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y. (1990) Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n. 10, p. 659.

Teillet, P.M., Fedosejevs, G. (1995) On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data. *Journal canadien de télédétection*, vol. 21, n. 4, p. 374.

The World Factbook 2001 (2001) préparé par le Central Intelligence Agency (CIA),  
<http://www.cia.gov/>

Verhoef, W. (1984) Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, vol. 16, p. 125.

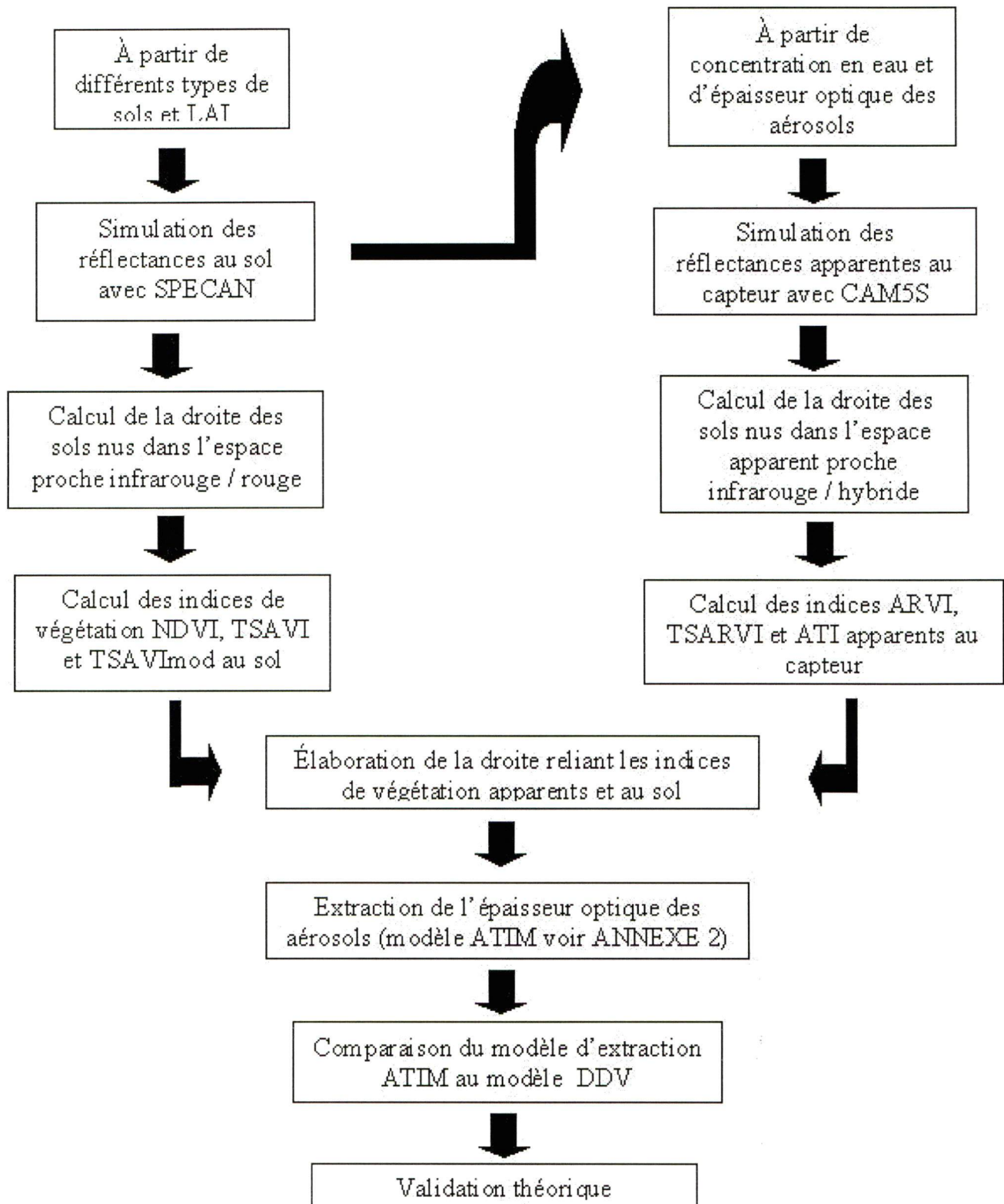
Verhoef, W. (1985) Earth observation modeling based on layer scattering matrices. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 165.

Vermote, E., Tanré, D., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J. (1997) Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), 6S User Guide Version 2, 31 p.

Vermote, E.F., Saleous, N. El., Justice, C.O., Kaufman, Y.J., Privette, J.L., Remer, L., Roger, J.C., Tanré, D. (1997) Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces : Background, operational algorithm and validation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, n. D14, p. 17 131.

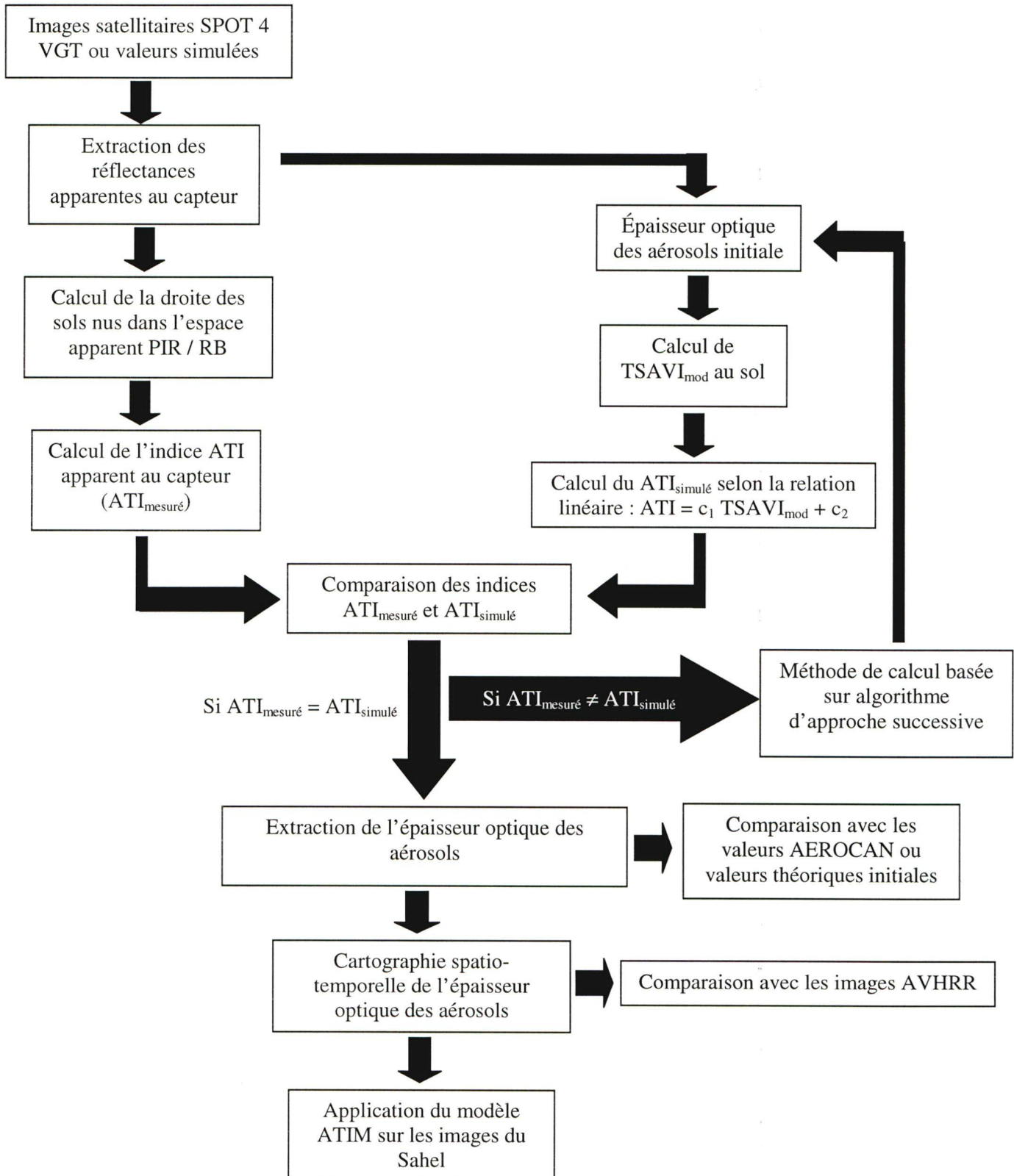
Yamagata, Y., Sugita, M. (1998) Land Cover Monitoring with a Vegetation-Soil-Water Index. *In* Monitoring of Wetlands with Remote Sensing, National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba-Shi, Ibaraki, 305-8056, Japan,  
<http://info.nies.go.jp :8091/wetland/kushiro/kusvs/> .

**ANNEXE 1 :**  
**Organigramme méthodologique : simulations théoriques**



## ANNEXE 2

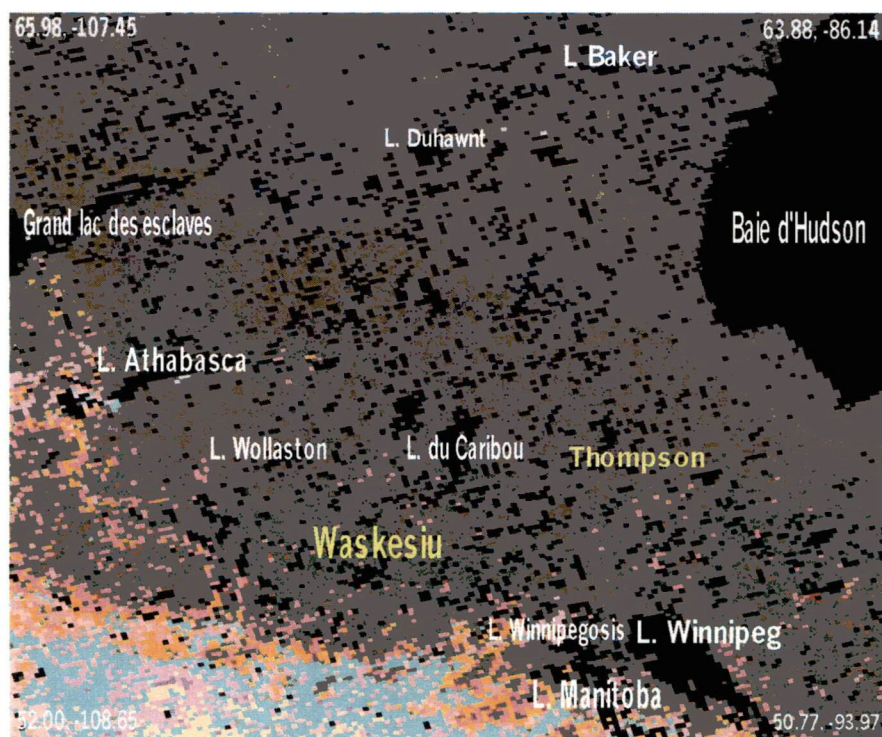
### Organigramme méthodologique : algorithme d'inversion ATIM





### ANNEXE 3

#### Représentation des différentes classes



(Adaptée de 1995 *Landcover of Canada*,  
*Canada Centre for Remote Sensing and Canadian Forest Services*)

#### **Forêt de conifères**

- Forte densité
- Moyenne densité, forêt du sud
- Moyenne densité, forêt du nord
- Faible densité, forêt du sud
- Faible densité, forêt du nord

#### **Forêt de feuillus**

- Arbres à feuilles caduques

#### **Forêt mixte**

- Résineux majoritaires
- Forêt mixte uniforme
- Forêt hétérogène
- Feuillus majoritaires

#### **Brûlées**

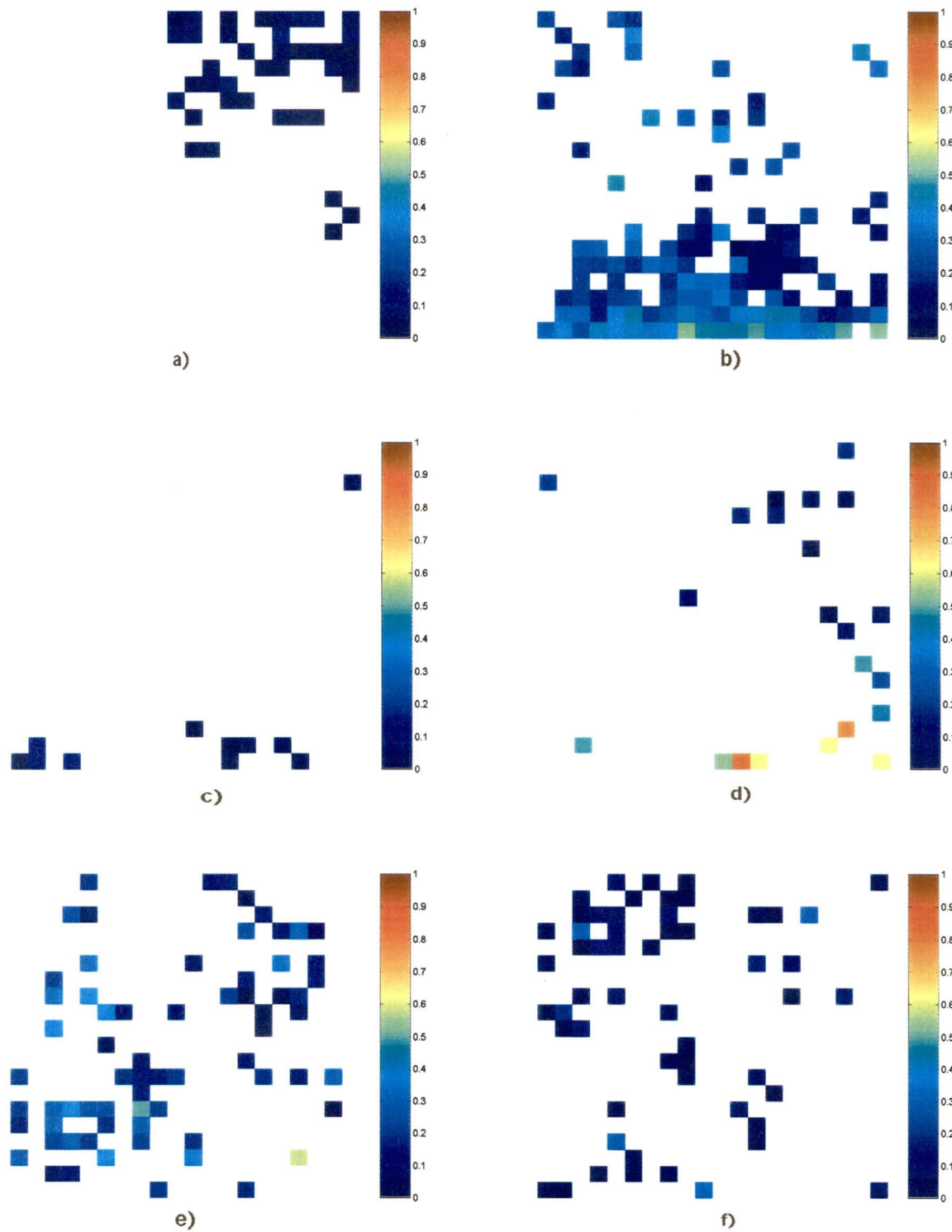
- Couvert végétal faible
- Couvert végétal

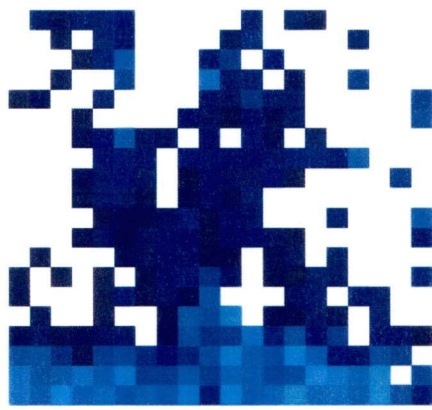
#### **Terrain ouvert**

- Forêt de transition
- Arbustes forte densité
- Arbustes faible densité
- Herbes
- Lichens et autres
- Arbustes et lichens
- Landes
- Faible couverture végétale
- Très faible couverture végétale
- Sol dénudé et roc

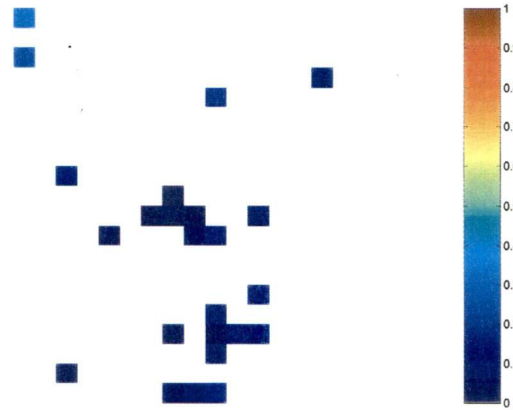
#### **Terres développées**

- Forte biomasse
- Moyenne biomasse
- Faible biomasse
- Champs et bois
- Bois et champs
- Champs et autres
- Urbain
- Eau
- Glaces

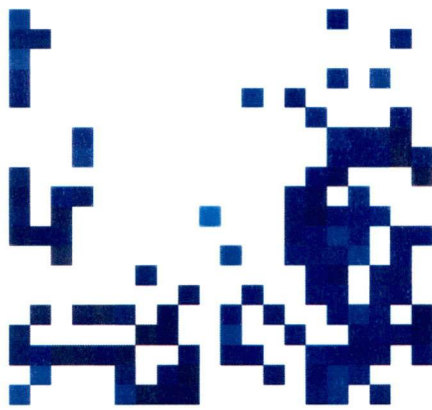
**ANNEXE 4****Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm, modèle DDV (NDVI > 0.5)**



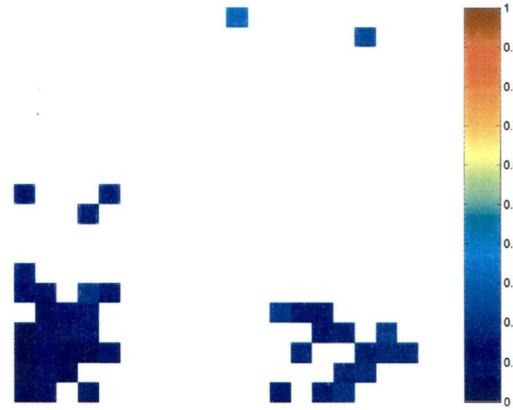
g)



h)



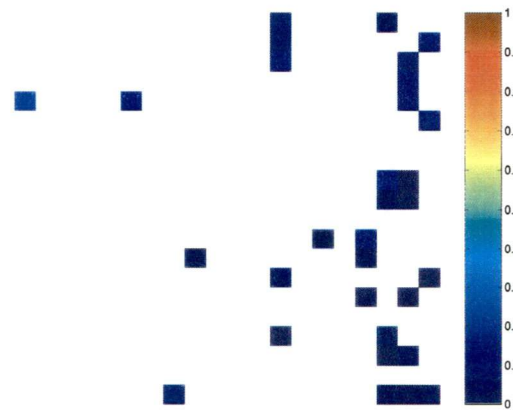
i)



j)

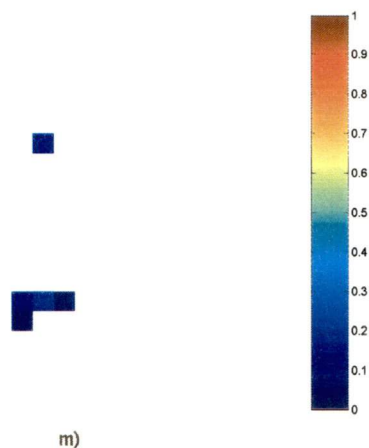


k)



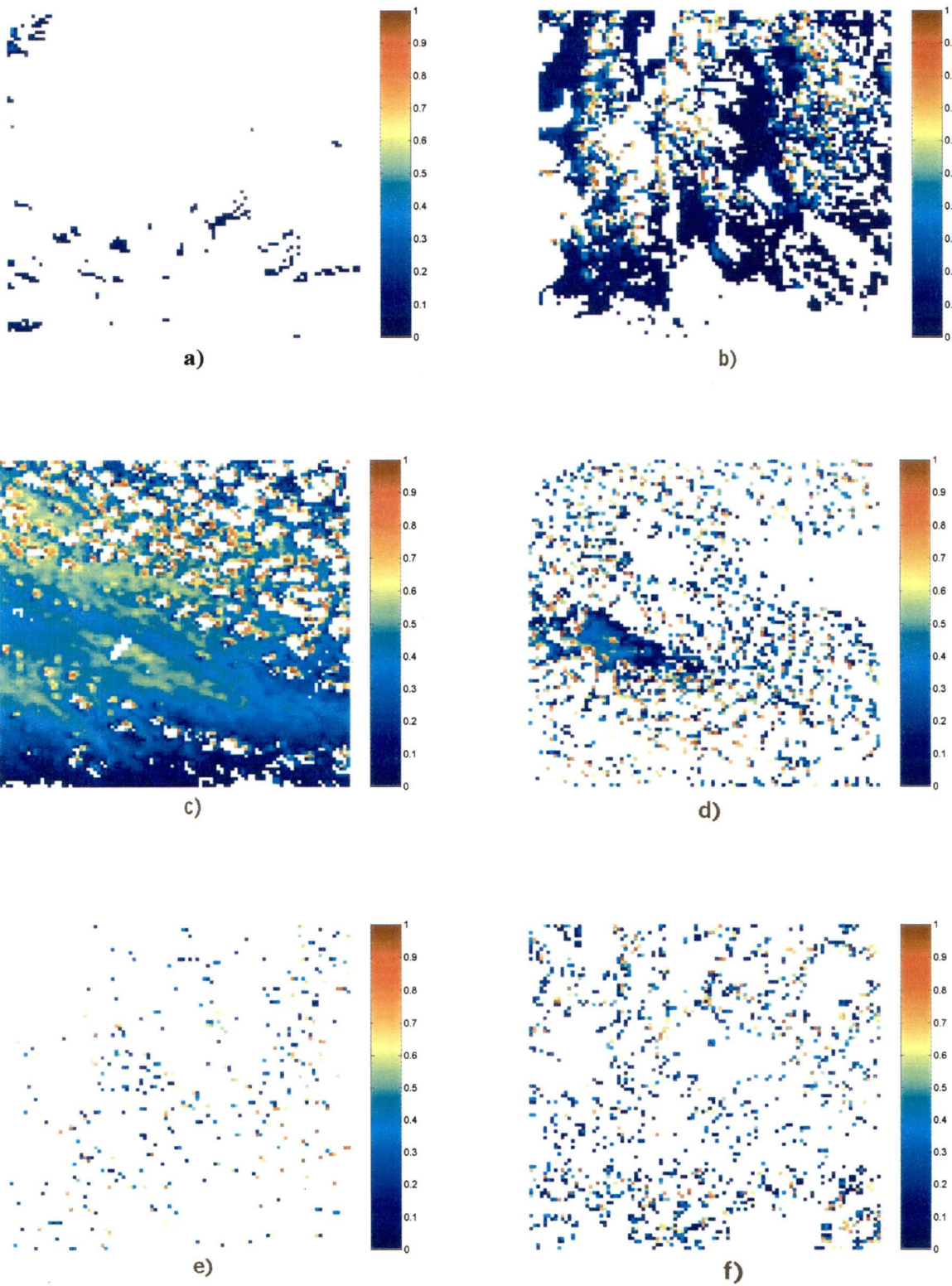
l)





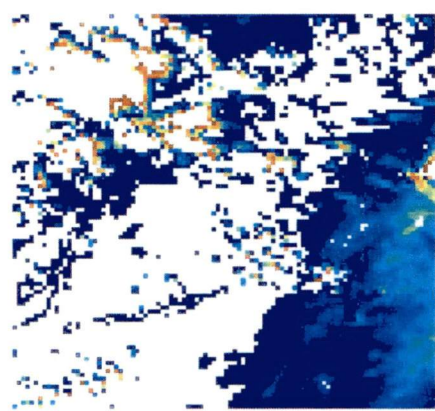
Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols avec le modèle d'extraction DDV ( $NDVI > 0.6$ )

- a) Thompson 09/07/98 b) Waskesiu 09/07/98 c) Thompson 16/07/98 d) Waskesiu 16/07/98  
e) Waskesiu 23/07/98 f) Thompson 24/07/98 g) Waskesiu 24/07/98 h) Thompson 03/08/98  
i) Waskesiu 03/08/98 j) Thompson 04/08/98 k) Thompson 05/08/98 l) Thompson 17/08/98  
m) Waskesiu 17/08/98

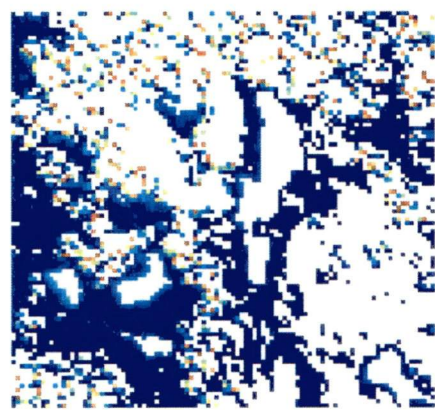
**ANNEXE 5****Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm avec le modèle ATIM**  
**(NDVI > 0.01)**



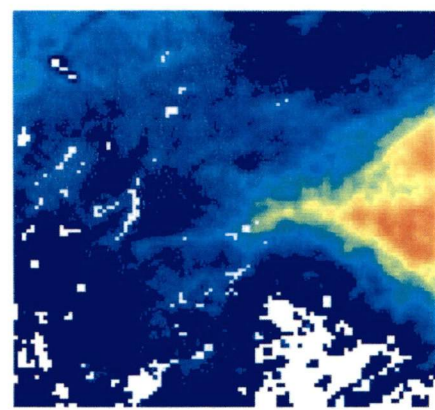
g)



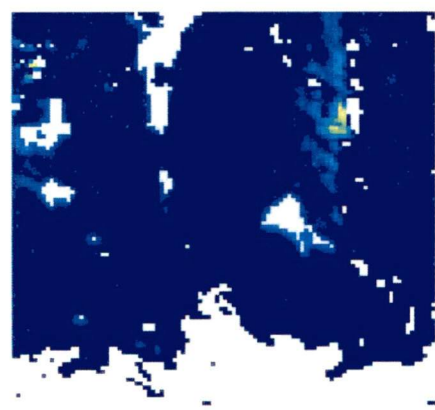
h)



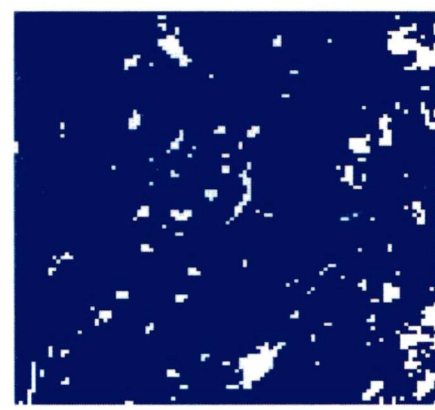
i)



j)

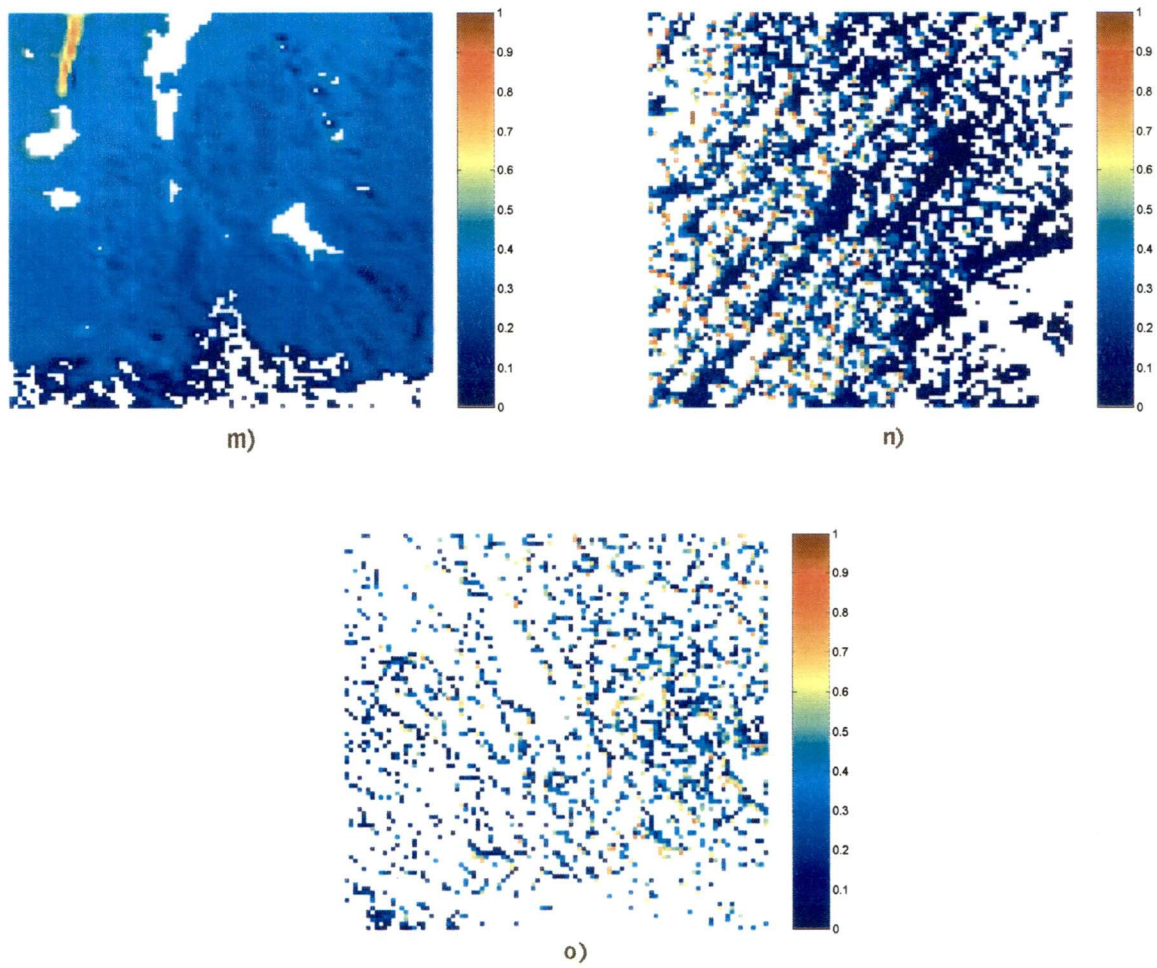


k)



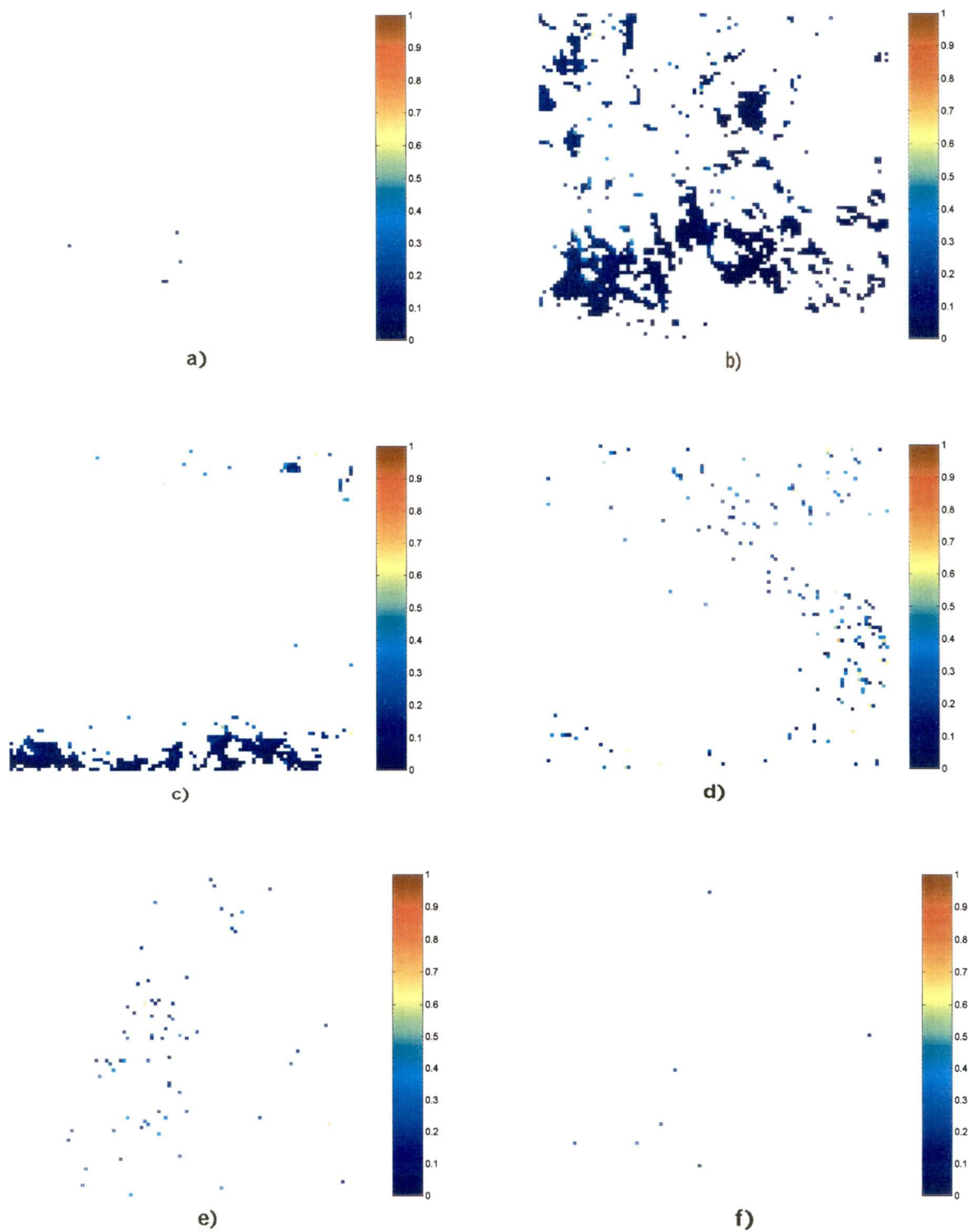
l)

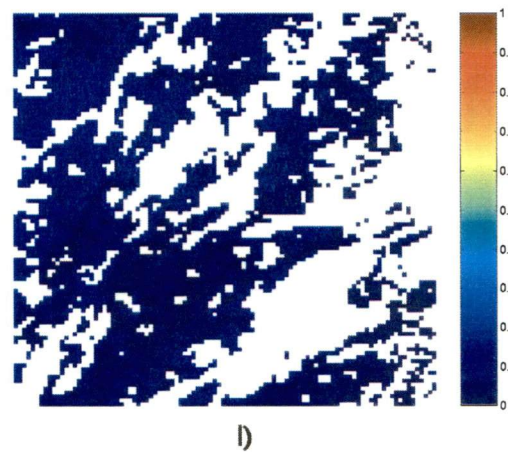
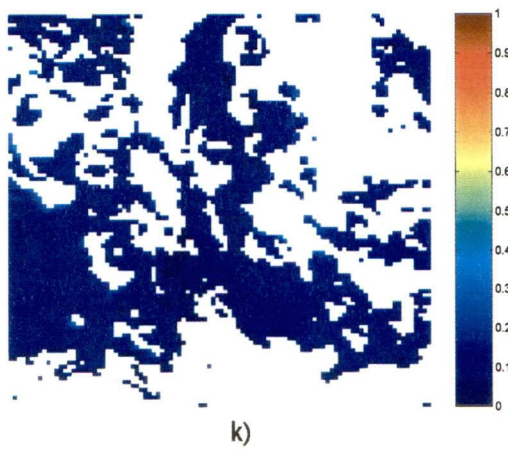
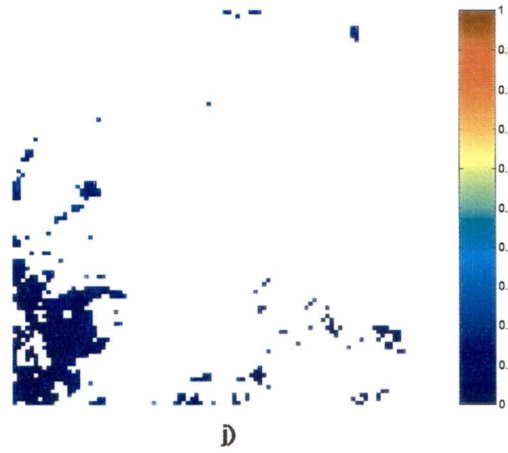
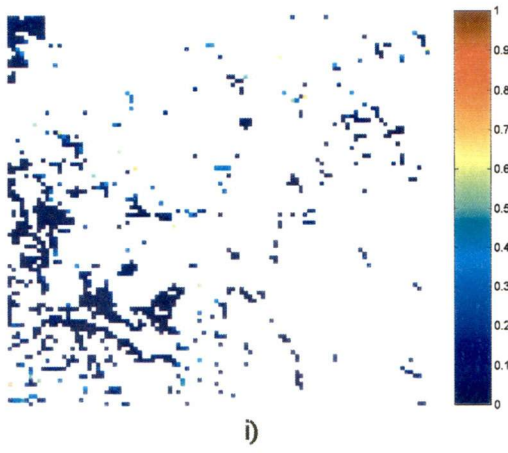
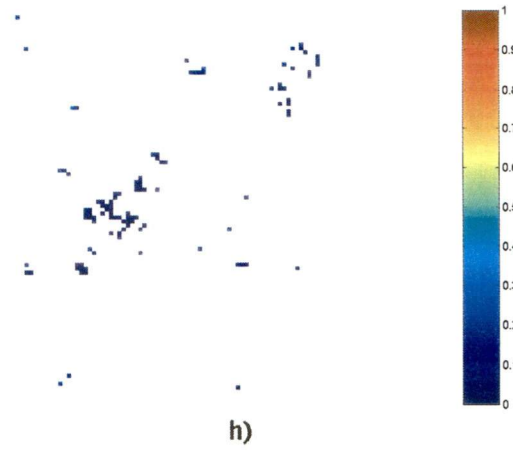
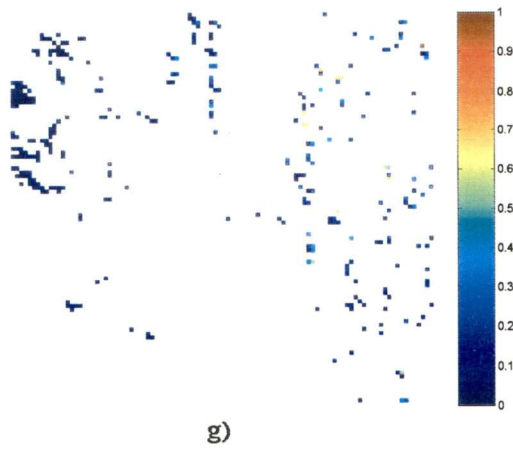




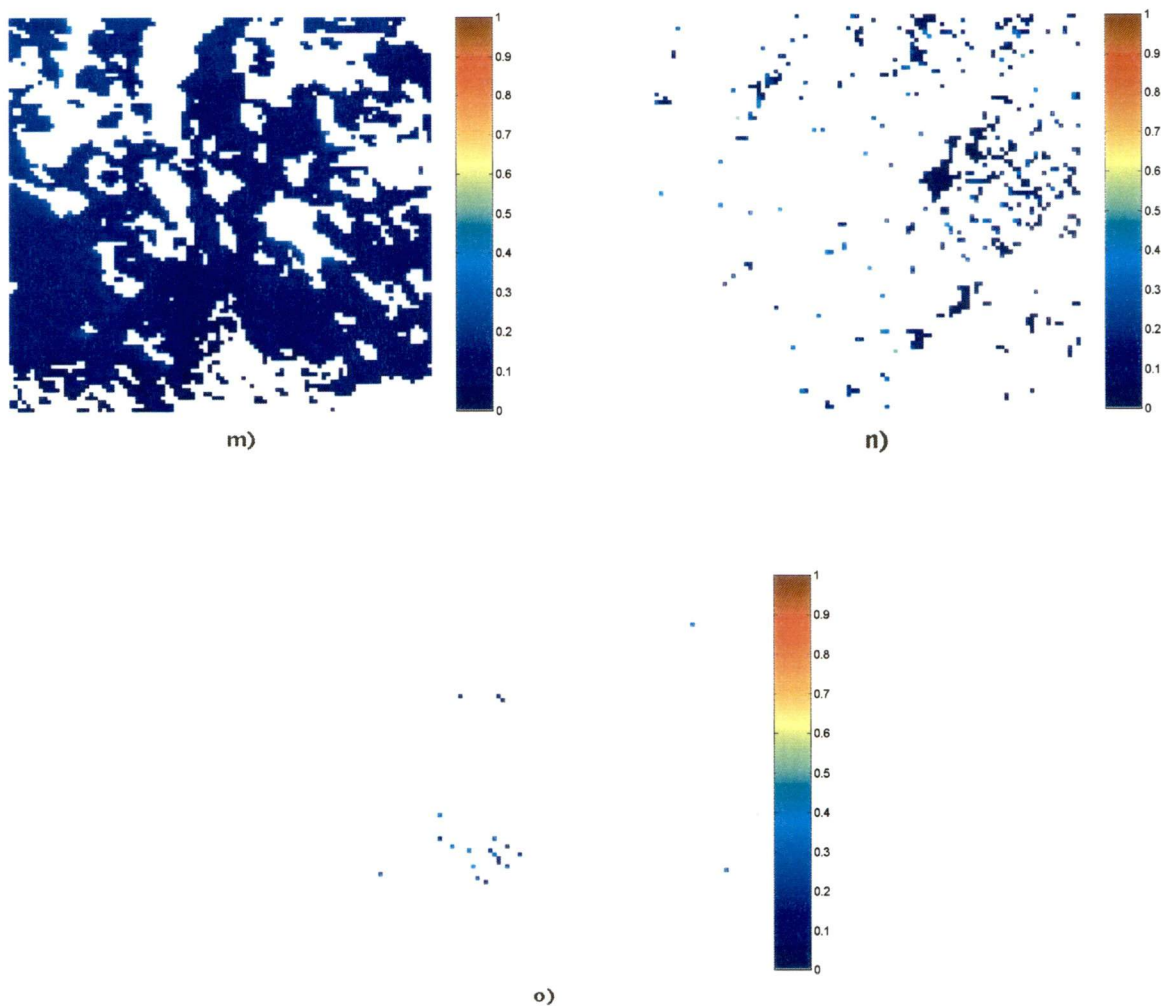
Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols avec le modèle d'extraction ATIM ( $NDVI > 0.01$ )

- a)Thompson 09/07/98 b) Waskesiu 09/07/98 c) Thompson 16/07/98 d) Waskesiu 16/07/98  
 e) Waskesiu 23/07/98 f) Thompson 24/07/98 g) Waskesiu 24/07/98 h) Thompson 03/08/98  
 i)Waskesiu 03/08/98 j) Thompson 04/08/98 k) Waskesiu 04/08/98 l) Thompson 05/08/98  
 m) Waskesiu 05/08/98 n) Thompson 17/08/98 o) Waskesiu 17/08/98

**ANNEXE 6****Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols à 550nm modèle ATIM**  
**(NDVI > 0.6)**







Cartographie de l'épaisseur optique des aérosols avec le modèle d'extraction ATIM ( $\text{NDVI} > 0.6$ )

- a) Thompson 09/07/98 b) Waskesiu 09/07/98 c) Thompson 16/07/98 d) Waskesiu 16/07/98  
 e) Waskesiu 23/07/98 f) Thompson 24/07/98 g) Waskesiu 24/07/98 h) Thompson 03/08/98  
 i) Waskesiu 03/08/98 j) Thompson 04/08/98 k) Waskesiu 04/08/98 l) Thompson 05/08/98  
 m) Waskesiu 05/08/98 n) Thompson 17/08/98 o) Waskesiu 17/08/98